ТОМ 7, №4, 2023 eISSN 2541-9129
РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Безопасность техногенных и природных систем

Техносферная безопасность / Technosphere Safety

Машиностроение / Machine Building

Химические технологии, науки о материалах, металлургия / Chemical Technologies, Materials Sciences, Metallurgy



www.bps-journal.ru
DOI 10.23947/2541-9129



Безопасность техногенных и природных систем

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2017 года)

eISSN 2541-9129
DOI: 10.23947/2541-9129

Том 7, № 4, 2023

Создан в целях освещения результатов исследований и реальных достижений по актуальным вопросам машиностроения, техносферной безопасности, современной металлургии и материаловедения. В журнале освещаются проблемы развития фундаментальных исследований и инженерных разработок в ряде важнейших областей технических наук. Одним из главных направлений деятельности журнала является интеграция в международное информационное пространство.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)
2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)
2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки)
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
2.10.1 – Пожарная безопасность (технические науки)
2.10.2 – Экологическая безопасность (технические науки)
2.10.3 – Безопасность труда (технические науки)

Индексация и архивация:	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
Наименование органа, зарегистрировавшего издание	Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 66531 от 21 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Учредитель и издатель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ).
Периодичность	4 выпуска в год
Адрес учредителя и издателя	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail	vestnik@donstu.ru
Телефон	+7 (863) 2–738–372
Сайт	https://bps-journal.ru
Дата выхода в свет	30.11.2023





Safety of Technogenic and Natural Systems

Peer-reviewed scientific and practical journal (published since 2017)

eISSN 2541-9129
DOI: 10.23947/2541-9129

Vol. 7, no. 4, 2023

The journal is created in order to highlight the results of research and real achievements on topical issues of Mechanical Engineering, Technosphere Safety, Modern Metallurgy and Materials Science. The journal highlights the problems of the development of fundamental research and engineering developments in a number of important areas of technical sciences. One of the main activities of the journal is integration into the international information space.

The journal publishes articles in the following fields of science:

Ground Transport and Technological Means and Complexes (Engineering Sciences)
Machines, Aggregates and Technological Processes (Engineering Sciences)
Metallurgical Science and Heat Treatment of Metals and Alloys (Engineering Sciences)
Powder Metallurgy and Composite Materials (Engineering Sciences)
Materials Science (Engineering Sciences)
Fire Safety (Engineering Sciences)
Environmental Safety (Engineering Sciences)
Occupational Safety (Engineering Sciences)

Indexing and archiving:	RISC, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
Name of the body that registered the publication	Mass media registration certificate ЭЛ № ФС 77 – 66531 dated Jule, 21, 2016, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
Founder and publisher	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU).
Periodicity	Quarterly (4 issues per year)
Address of the founder and publisher	Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
E-mail	vestnik@donstu.ru
Telephone	+7 (863) 2–738–372
Website	https://bps-journal.ru
Date of publication	30.11.2023

Editorial Board

Содержание

Contents

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 621.94 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-7-19

Технические решения по снижению величины проскока пылевых частиц при очистке выбросов производства железобетонных изделий пылеуловителями со встречными закрученными потоками

Б.Ч. Месхи[1], **А.И. Евтушенко**[1]✉, **Д.П. Боровков**[2]

[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[2] Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация

✉ a.evtushenko@mail.ru

Аннотация

Введение. Производство железобетонных изделий, будучи основой современного индустриального строительства, является весьма существенным источником пылевых выбросов. Традиционные методы очистки зачастую неспособны обеспечить соблюдение требований к качеству воздушной среды, а замена их более современными требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат. Одним из наиболее перспективных путей решения проблемы является применение нового класса инерционных пылеуловителей со встречными закрученными потоками, сочетающими конструктивную простоту и низкие эксплуатационные затраты с достаточно высокой эффективностью работы. Целью работы был анализ факторов, оказывающих влияние на величину коэффициента проскока мелкодисперсных пылевых частиц, а также разработка конструктивных решений, направленных на его снижение.

Материалы и методы. Проведен аналитический обзор технических решений, направленных на снижение величины проскока, на основании которых разработаны конструкции нижнего ввода пылеуловителей со встречными закрученными потоками. Для подтверждения эффективности разработанных конструкций применялись методы вычислительного эксперимента и натурные замеры.

Результаты исследования. Посредством проведения численных экспериментов получены сведения об аэродинамической картине течения в сепарационной камере пылеуловителя ВЗП, а также произведена оценка величины проскока пылевых частиц. Разработаны решения по конструктивному оформлению нижнего коаксиального ввода закрученного потока пылеуловителей на встречных закрученных потоках, учитывающие особенности пылевых загрязнений, образующихся при работе технологического оборудования железобетонного производства.

Обсуждение и заключение. Было установлено наличие смещения оси вторичного закрученного потока от оси симметрии сепарационной камеры. Следствием этого является некоаксиальность первичного и вторичного потоков, приводящая к снижению интенсивности закрутки, образованию паразитных вихрей, и, как следствие, увеличению значения коэффициента проскока. Особенно сильно данный эффект проявляется при большой доле мелкодисперсных пылевых частиц, характерной для пылевых загрязнений, образующихся при производстве железобетонных изделий. Предложенная конструкция коаксиального ввода вторичного закрученного потока снижает величину данного эксцентриситета, что позволяет достигать существенного снижения величины проскока мелкодисперсных частиц, характерных для пылевых выбросов железобетонных производств. Полученные результаты могут быть эффективно использованы как в производстве железобетонных изделий, так и в других отраслях строительного производства, для которого характерно интенсивное образование мелкодисперсных пылевых выбросов.

Ключевые слова: пылеуловитель со встречными закрученными потоками, коэффициент проскока частиц пыли, предприятия по производству железобетонных изделий и конструкций

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Месхи Б.Ч., Евтушенко А.И., Боровков Д.П. Технические решения по снижению величины проскока пылевых частиц при очистке выбросов производства железобетонных изделий пылеуловителями со встречными закрученными потоками. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(4):7–19. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-7-19

Original article

Technical Solutions to Reduce the Amount of Dust Particle Breakthrough when Cleaning Emissions from the Production of Reinforced Concrete Products Using Dust Collectors with Counter Swirling Flows

Besarion Ch. Meskhi[1], **Aleksandr I. Evtushenko**[1] ✉, **Dmitry P. Borovkov**[2]

[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

✉ a.evtushenko@mail.ru

Abstract

Introduction. The production of reinforced concrete products, being the basis of modern industrial construction, is a very significant source of dust emissions. Traditional cleaning methods are often unable to ensure the compliance with air quality requirements, and replacing them with more modern ones requires significant capital and operational costs. One of the most promising ways to solve the problem is the use of a new class of inertial dust collectors with counter swirling flows, combining constructive simplicity and low operating costs with sufficiently high work efficiency. The aim of the work was to analyze the factors influencing the magnitude of the breakthrough coefficient of fine dust particles, as well as the development of constructive solutions aimed at reducing it.

Materials and Methods. An analytical review of technical solutions aimed at reducing the breakthrough magnitude was carried out, on the basis of which the designs of the lower input of dust collectors with counter swirling flows were developed. Methods of computational experiment and field measurements were used to confirm the effectiveness of the developed structures.

Results. By means of numerical experiments, the information about the aerodynamic flow pattern in the separation chamber of the CSF dust collector was obtained, and the breakthrough magnitude of dust particles was estimated. The solutions were developed for the design of the lower coaxial input of the swirling flow of dust collectors on the counter swirling flows, taking into account the features of dust pollution generated during the operation of technological equipment of reinforced concrete production.

Discussion and Conclusion. The presence of a displacement of the axis of the secondary swirling flow from the axis of symmetry of the separation chamber was established. The consequence of this was the non-coaxiality of the primary and secondary flows, which led to a decrease in the intensity of the twist, the formation of parasitic vortices, and, as a consequence, an increase in the value of the breakthrough coefficient. This effect was especially pronounced with a large proportion of fine dust particles, characteristic of dust pollution formed during the production of reinforced concrete products. The proposed design of the coaxial input of the secondary swirling flow reduced the magnitude of this eccentricity, which made it possible to achieve a significant reduction in the breakthrough magnitude of fine particles characteristic of dust emissions of reinforced concrete industries. The results obtained can be effectively used both in the production of reinforced concrete products and in other branches of construction production, which is characterized by intensive formation of fine dust emissions.

Keywords: dust collector with counter swirling flows, dust particle breakthrough coefficient, enterprises for the production of reinforced concrete products and structures

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Meskhi BCh, Evtushenko AI, Borovkov DP. Technical Solutions to Reduce the Amount of Dust Particle Breakthrough when Cleaning Emissions from the Production of Reinforced Concrete Products Using Dust Collectors with Counter Swirling Flows. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):7–19. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-7-19

Введение. Конструкций пылеулавливающих аппаратов пылегазоочистки постепенно усложняются [1–5], что сопровождается повышением затрат на их производство. Данное обстоятельство затрудняет широкое применение пылеуловителей новых типов: аппаратов мокрой очистки, электрофильтров, тканевых фильтров различных типов. Современные требования в области чистоты воздушной среды требуют расширения применения пылеулавливающих аппаратов и повышения эффективности их работы [6]. Перспективным путем разрешения данного противоречия является совершенствование инерционных методов пылеулавливания, характеризующихся конструктивной простотой и дешевизной эксплуатации. Одним из направлений развития инерционных способов пылеулавливания являются пылеуловители на встречных закрученных потоках (далее ВЗП). Их главным достоинством являются более низкие, по сравнению с циклонами, значения коэффициента проскока пыли, устойчивость работы и простота конструкций [6]. Однако распространение данного вида пылеуловителей сдерживается недостаточным объемом информации эффективности применения в конкретных областях промышленного производства. Помимо этого, существует большое разнообразие конструктивных схем подобных аппаратов, каждый из которых требует тонкой настройки в условиях конкретного технологического процесса. Поэтому разработка технических решений для адаптации пылеуловителей на встречных закрученных потоках является актуальной задачей.

Существует два основных типа пылеуловителей на встречных закрученных потоках. К первому типу относятся аппараты, в которых для создания вторичного закрученного потока используется сжатый воздух. Вход, через который подается сжатый воздух, располагается сверху и называется вторичным. Ко второму типу относят аппараты, созданные на базе циклонов [6–8]. Основное отличие аппаратов ВЗП от циклонов состоит в том, что к обычному верхнему входу добавляется нижний вход. На описываемые конструкции в 1953 году был получен патент (рис. 1) Е. Шауфлера и Х. Ценнека [9].

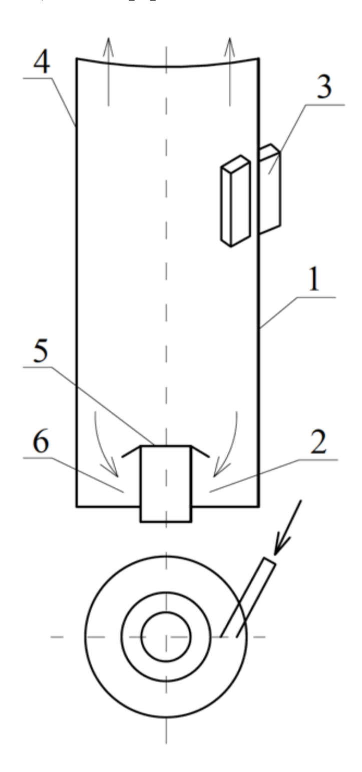


Рис. 1. Вихревая камера для отделения твердых и жидких аэрозольных частиц с помощью вспомогательного закручивающего потока газа: 1 — сепаратор; 2 — ввод первичного потока; 3 — сопло для вторичного потока; 4 — выхлопная труба; 5 — отбойная шайба; 6 — бункер для сбора пыли [10]

В 1972 году были предложены конструкции ВЗП соплового (рис. 2 *а*) и лопаточного (рис. 2 *б*) типов [6].

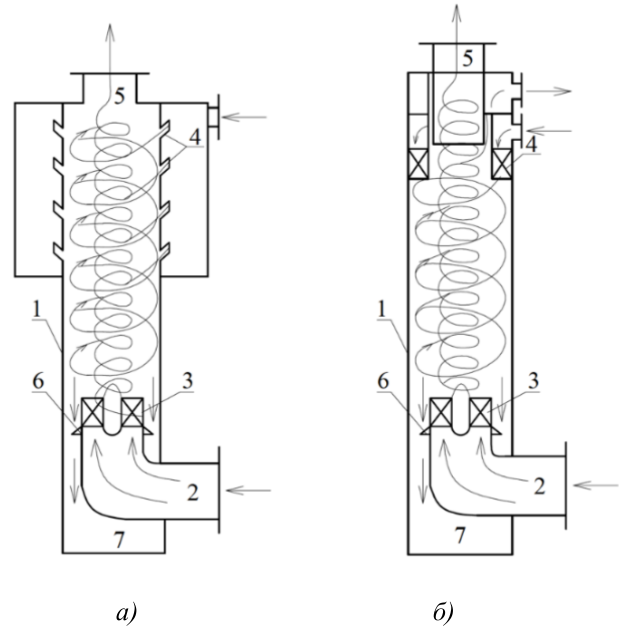


Рис. 2. Вихревые пылеуловители: *а* — соплового типа: 1 — камера; 2 — входной патрубок; 3 — лопаточный завихритель типа «розетки»; 4 — сопла; 5 — выходной патрубок; 6 — подпорная шайба; 7 — пылевой бункер; *б* — лопаточного типа: 1 — камера; 2 — входной патрубок; 3 — лопаточный завихритель типа «розетки»; 4 — кольцевой лопаточный завихритель; 5 — выходной патрубок; 6 — подпорная шайба; 7 — пылевой бункер [10]

Исключение инерционных пылеуловителей из компоновочных схем систем очистки, как и применение циклонов устаревшей конструкции в качестве первой ступени, негативно сказывается на ресурсе, энергоэффективности и эксплуатационных расходах. Пылеуловители на встречных закрученных потоках, ввиду повышенной эффективности сепарирования частиц средних и мелких фракций, могут существенно разгружать более дорогостоящее и энергоемкое пылеулавливающее оборудование, повышая эксплуатационные характеристики систем очистки выбросов и снижая стоимость их эксплуатации.

В настоящее время изучение аппаратов ВЗП и их внедрение в различные производства ведутся несколькими научными коллективами России. В работах В.Н. Азарова, С.А. Кошкарева, Н.М. Сергиной, Д.П. Боровкова и др. был предложен ряд конструктивных изменений в аппаратах ВЗП, а также разработаны различные схемы систем пылеочистки, в которых используются циклоны, ВЗП и рукавные фильтры [6]. Например, для повышения надежности эксплуатации аппаратов ВЗП, в том числе на заводах ЖБИиК, предложено в ряде конструкций закручиватель нижнего входа выносить за пределы аппаратов [6, 11]. Кроме того, разработан ряд аппаратов с несколькими верхними входами, например, коллекторы-пылеуловители (рис. 3) [6].

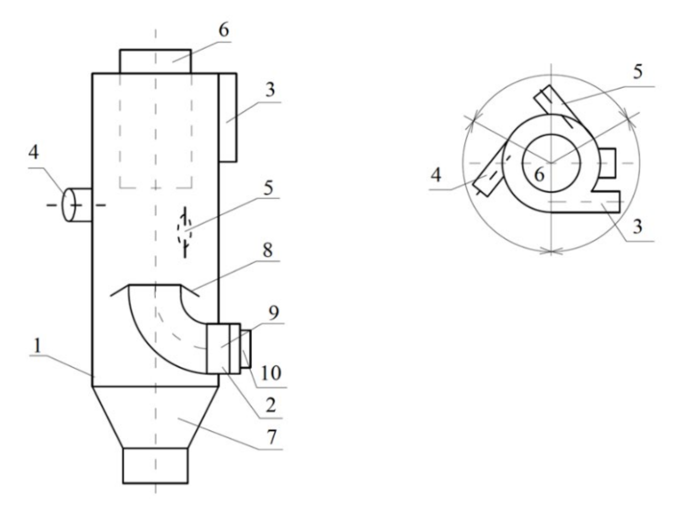


Рис. 3. Схема коллектора-пылеуловителя КП-ВЗП: 1 — корпус; 2 — ввод вторичного запыленного потока; 3, 4, 5 — вводы первичного запыленного потока; 6 — патрубок вывода очищенного воздуха; 7 — пылесборник; 8 — отбойная шайба; 9 — завихритель; 10 — люк для прочистки [10]

Работы Е.И. Богуславского, В.Н. Азарова и др. посвящены стохастическим моделям расчета ВЗП [6, 11]. В работах [12–15] проведены расчеты фракционной эффективности аппаратов ВЗП с использованием современных программных комплексов.

Как следует из анализа литературных источников по данной теме, в настоящее время конструктивные схемы пылеуловителей ВЗП различаются в основном типом ввода вторичного потока (с внешним и внутренним закручивателем), а основные усилия исследователей направлены на изучение аэродинамических параметров и создание расчетных методик. Однако, именно в совершенствовании конструктивного исполнении вторичного ввода кроется резерв, позволяющий снизить значение коэффициента проскока. Основной особенностью, характерной для пылевых частиц, образующихся при производстве железобетонных изделий, является их мелкодисперсность [16, 17]. Частицы мелких фракций в большей степени склонны к проскоку, особенно в условиях недостаточной интенсивности закрутки вторичного потока. Одним из факторов, влияющих на интенсивность закрутки является геометрическая конфигурация вторичного ввода, вносящая серьезные искажения в кинематическую структуру течения в нижней области сепарационной камеры пылеуловителей ВЗП [17]. Помимо снижения общей интенсивности закрутки потока, при взаимодействии его с патрубком вторичного ввода возникают нежелательные паразитные завихрения, способные вызвать унос уже уловленных пылевых частиц [18].

Целью данного исследования стал анализ факторов, оказывающих определяющее влияние на величину коэффициента проскока мелкодисперсных пылевых частиц железобетонного производства и разработка соответствующих конструктивных решений по конструктивному оформлению нижнего ввода закрученного потока пылеуловителей ВЗП.

Материалы и методы. Изучение параметров движения пылевоздушной смеси в нижней части сепарационной камеры пылеуловителя со встречными закрученными потоками осуществлялось посредством вычислительного эксперимента. Кинематическая модель движения газового в объеме сепарационной камеры пылеуловителя на встречных закрученных потоках, реализованные при помощи численного решения уравнений Навье-Стокса и неразрывности, замкнуты при помощи k-ε модели турбулентности в приложении COSMOSFlowWorks для программного обеспечения SolidWorks.

Для решения поставленной задачи были построены модели пылеуловителя ВЗП нескольких типоразмеров, имеющие стандартную обвязку. Размеры основных элементов вихревого пылеуловителя приняты типичными для серий вихревых пылеуловителей ВЗП и ВИП. В качестве прототипов при построении моделей использованы пылеуловители, имеющие диаметры сепарационных камер 160, 350 и 700 мм. Схема расчетной модели приведена на рис. 4 (выполнен с применением среды численного моделирования SolidWorks). На первом этапе для привязки математической модели к конкретной задаче и к расчетной области задавались начальные и граничные условия.

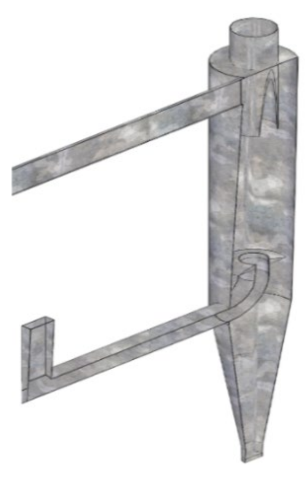


Рис. 4. Схема расчетной модели вихревого пылеуловителя

План проведения экспериментальных исследований включал три серии опытов, проводимых для разных значений расхода потока, подаваемого во входное сечение нижнего закручивателя (зона В) (рис. 5).

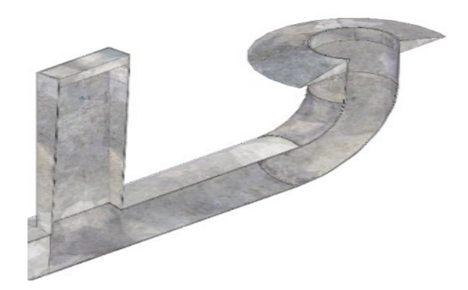


Рис. 5. Сечение нижнего входного патрубка вторичного пылегазового потока пылеуловителя ВЗП

Схема определения конструктивных параметров нижнего ввода приведена на рис. 6 (выполнен с применением среды численного моделирования SolidWorks).

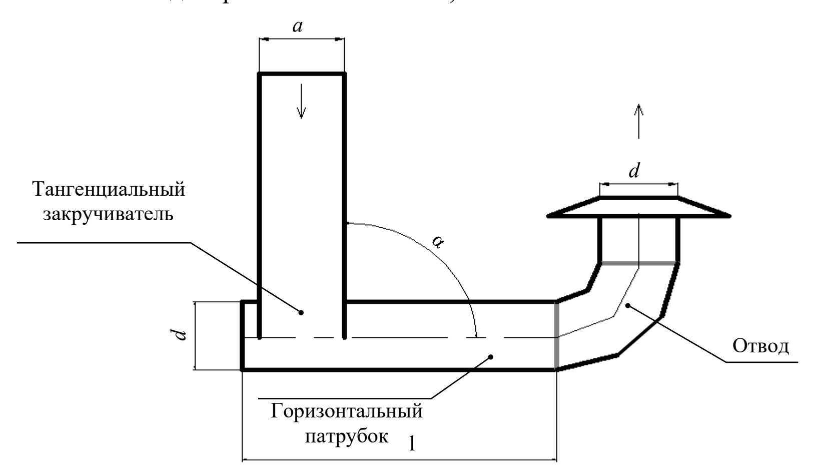


Рис. 6. Характерные конструктивные размеры закручивателя вторичного потока ВЗП:
l — длина патрубка закрученного потока, отнесенная к диаметру (*d*);
a — относительная ширина тангенциального патрубка, отнесенная к диаметру (*d*);
α — угол ввода тангенциального патрубка

После вычислений значений скоростей газового потока, характеризующих поле течения в расчетных сечениях, производились вычисления траекторий пылевых частиц фракций, характеризуемых значениями эквивалентных диаметров пылевых частиц $d_ч$ = 10–100 мкм. Исходя из полученных результатов, вычислялась доля количества частиц, поступающих в объем сепарационной камеры вихревого пылеуловителя через верхний и нижний вводы. Также для аэродинамических режимов, заданных диапазоном значений среднерасходовых по сечению сепарационной камеры чисел Рейнольдса *R*e = 8 700–28 000, вычислены значения аэродинамического сопротивления пылеуловителя и угловых скоростей в пристенной зоне сепарационной камеры, оказывающих определяющее значение на величину проскока пылевых частиц.

Натурные измерения величины коэффициента проскока проводились на действующих пылеуловителях в соответствии со стандартными методиками измерений в дисперсионных потоках НИИОГАЗ с использованием пневмометрических трубок Пито, микроманометров ММН – 250, электроаспираторов и фильтров АФА.

Результаты исследования. На рис. 7–9 (выполнены с применением среды численного моделирования SolidWorks) в виде поверхностей отклика представлены результаты расчетов значений угловых скоростей, полученные в ходе варьирования конструктивных характеристик нижнего ввода при *R*e = 8 700–28 000.

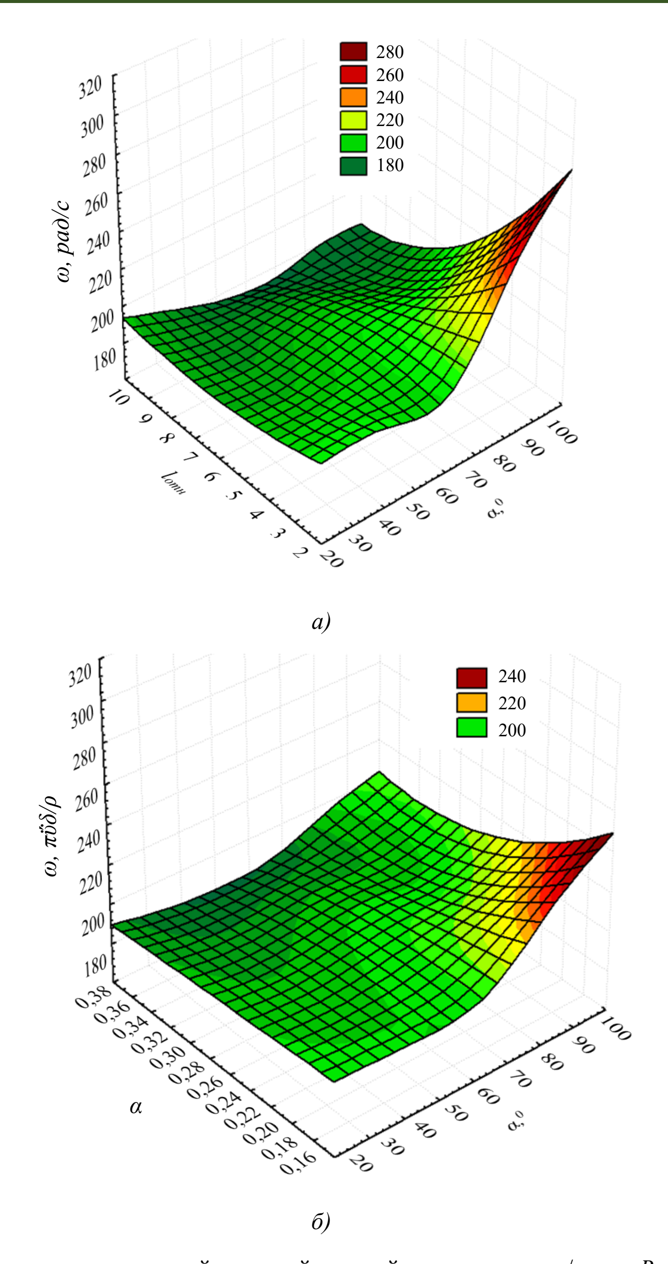
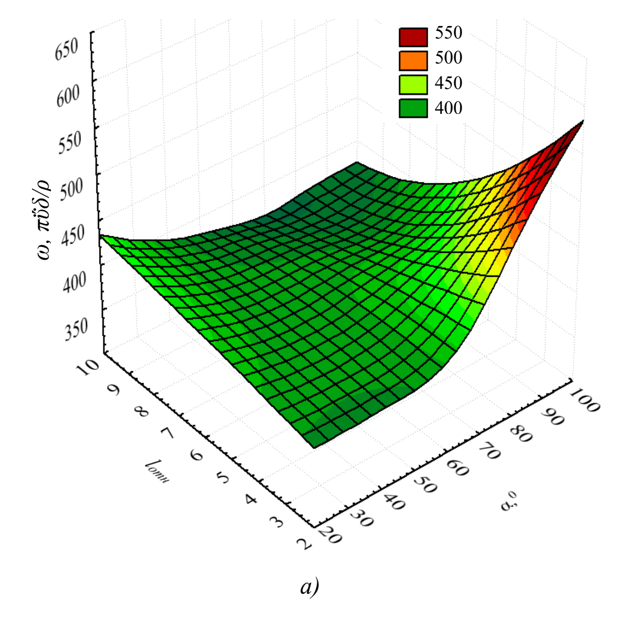
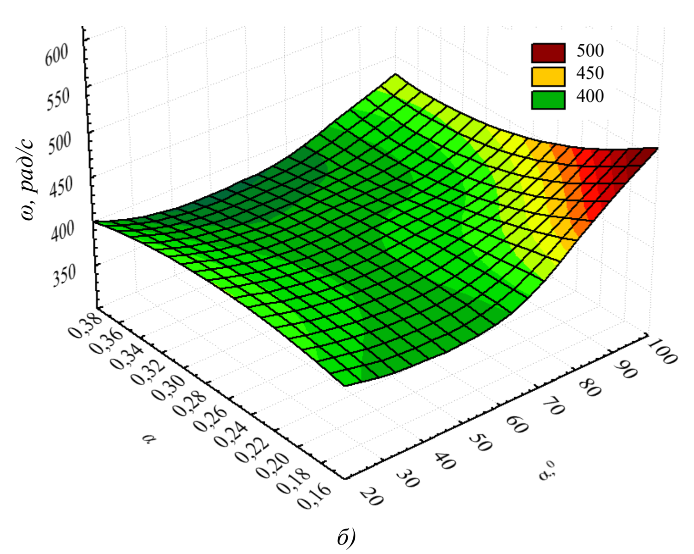


Рис. 7. Результаты вычислений значений угловой скорости ω, рад/с, при *R*e = 8 700:
а — зависимость величины угловой скорости потока от значений относительной длинны патрубка закрученного потока угла ввода тангенциального патрубка ω ($l_{отн}$;α); *б* — зависимость величины угловой скорости потока от значений относительной ширины тангенциального патрубка потока и угла ввода тангенциального патрубка ω ($l_{отн}$;α)

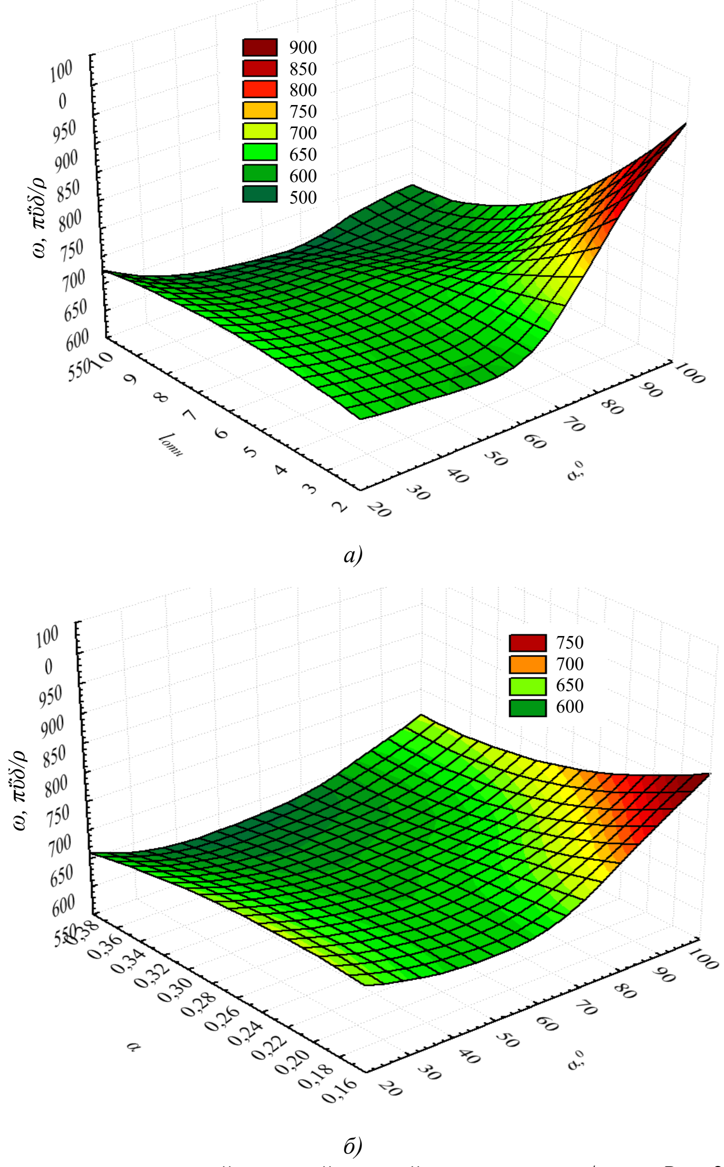


а)



б)

Рис. 8. Результаты вычислений значений тангенциальной скорости ω, рад/с, при *R*e = 17 900: *а* — зависимость величины угловой скорости потока от значений относительной длинны патрубка закрученного потока и угла ввода тангенциального патрубка ω ($l_{отн}$;α); *б* — зависимость величины угловой скорости потока от значений относительной ширины тангенциального патрубка потока и угла ввода тангенциального патрубка ω ($l_{отн}$;α)



а)

б)

Рис. 9. Результаты вычислений значений угловой скорости ω, рад/с, при *R*e = 28 000: *а* — зависимость величины угловой скорости потока от значений относительной длинны патрубка закрученного потока и угла ввода тангенциального патрубка ω ($l_{отн}$;α); *б* — зависимость величины угловой скорости потока от значений относительной ширины тангенциального патрубка потока и угла ввода тангенциального патрубка ω ($l_{отн}$;α)

На рис. 10 (выполнен с применением среды численного моделирования SolidWorks) представлено распределение значений тангенциальных скоростей газового потока по сечению сепарационной камеры на уровне среза выходного патрубка вторичного потока.

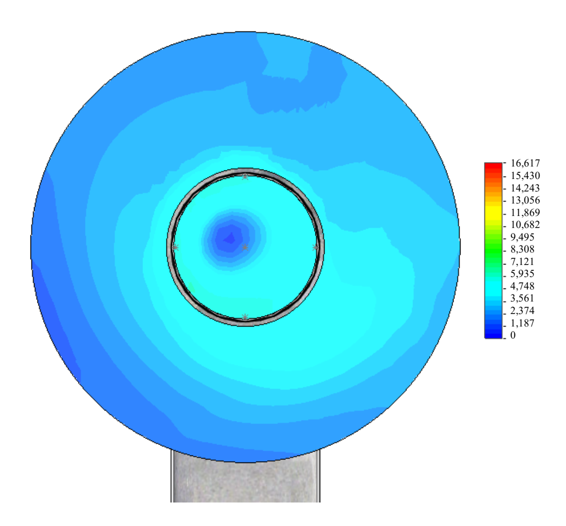


Рис. 10. Распределение значений тангенциальных скоростей газового потока по сечению сепарационной камеры на уровне среза выходного патрубка вторичного потока (м/с)

Для очистки пылевых выбросов железобетонного производства предложена конструкция пылеуловителя ВЗП с аксиальным подводом вторичного потока для применения на заводах ЖБИиК (рис. 11) [19].

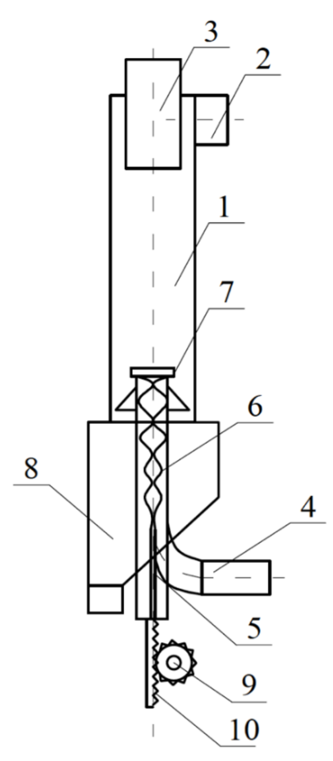


Рис. 11. Схема устройства вихревого пылеуловителя с завихрителем шнекового типа:
1 — цилиндрическая сепарационная камера; 2 — тангенциальный ввод очищаемого потока; 3 — коаксиальный выхлопной патрубок; 4 — аксиальный патрубок первичного ввода; 5 — закручиватель шнекового типа; 6 — шнековый завихритель; 7 — коническая отбойная шайба; 8 — бункер для сбора пыли; 9 — зубчатое колесо; 10 — зубчатая рейка [19]

На втором этапе были реализованы натурные измерения значений коэффициента проскока для мелкодисперсной пыли предприятий по производству железобетонных изделий на типовых пылеуловителях ВЗП и на аппарате предлагаемой конструкции. Зависимости, полученные в ходе экспериментальных исследований, приведены на рис. 12. Для сравнения на рисунке также приведены результаты, полученные при испытаниях ВЗП классической конструкции (кривая 4).

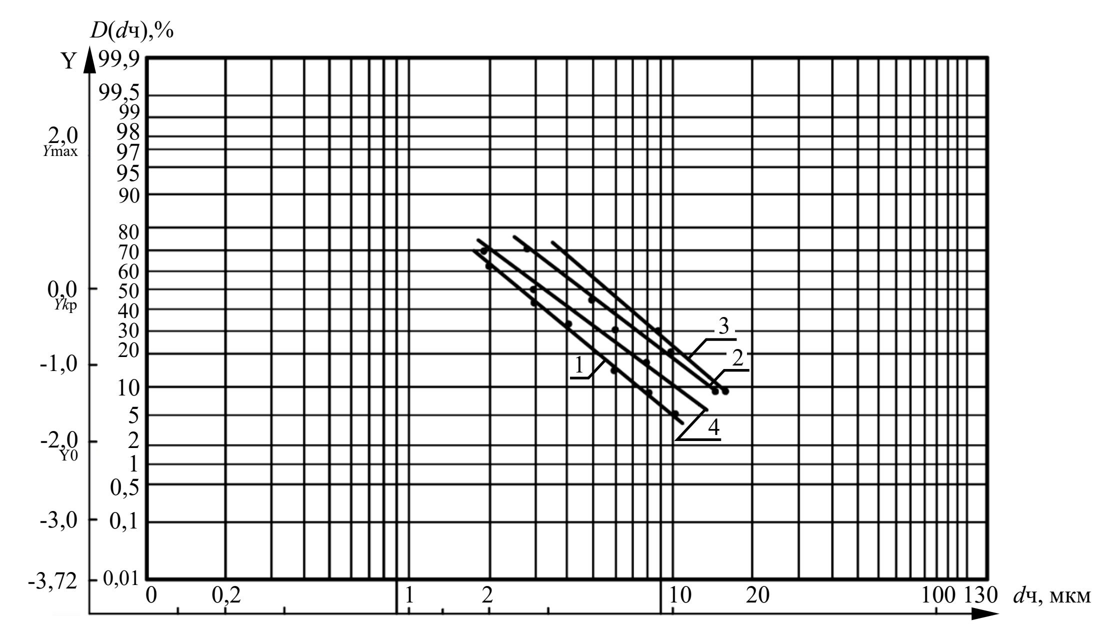


Рис. 12. Результаты экспериментальных исследований функций проскока у пылеуловителей ВЗП:
1 — ВЗП-200; 2 — ВЗП-400; 3 — ВЗП-600 с коаксиальным вводом; 4 — ВЗП-200 конструкции В.Д. Кононенко

Обсуждение и заключение. Результаты, полученные в ходе вычислительных экспериментов, убедительно свидетельствуют в пользу предположения о наличии негативного влияния патрубка вторичного ввода на кинематическую структуру потока в нижней части сепарационной камеры пылеуловителей на встречных закрученных потоках. Из данных, представленных на рис. 10, следует, что ось вращения потока смещена от оси сепарационной камеры. Это приводит к снижению полезного действия вихревого эффекта, заключающегося в повышении интенсивности закрутки за счет взаимодействия однонаправленно закрученных потоков.

Несовпадение оси вращения закрученного потока с осью сепарационной камеры, являющейся также осью вращения первичного закрученного потока, формируемого верхним тангенциальным вводом, приводит к ощутимому повышению величины проскока пылевых частиц. Данный факт объясняется образованием паразитных завихрений на границах слияния некоаксиальных закрученных потоков. Следствием этого является унос уже уловленных или попавших в пристенную зону пылевых частиц. Будучи вырванными из пристенного потока, либо взметаемыми паразитным вихрем частицы пыли попадают во вторичный поток, и, в силу его оппозитной направленности, уносятся в патрубок чистого газа.

Следует отметить, что наиболее ярко данный эффект проявляется на частицах мелких фракций, для которых характерно существенное превалирование аэродинамических сил над массовыми. И именно данный факт делает задачу устранения негативного влияния вторичного патрубка, вносящего нежелательные искажения в течение вторичного закрученного потока, особенно актуальной в условиях применения аппаратов ВЗП в железобетонном производстве, для пылевых выбросов которого характерно наличие большой доли мелкодисперсных пылевых частиц.

Для устранения описанной проблемы предлагается применение коаксиального ввода вторичного потока (рис. 12) Основной особенностью предлагаемой конструкции вихревого пылеуловителя является применение коаксиального ввода вторичного закрученного потока, достигаемого посредством использования закручивателей шнекового типа. Применение такой компоновочной схемы позволяет оптимизировать движение закрученного потока в нижней части сепарационной камеры, а также снизить вероятность возникновения подсосов. Отсутствие радиального патрубка вторичного потока, перекрывающего часть живого сечения сепарационной камеры пылеуловителей ВЗП традиционной конструкции, позволяет избежать нежелательного нарушения кинематической структуры потока. Отсутствие паразитных завихрений потока в нижней части сепарационной камеры позволяет существенно понизить вторичный унос пылевых частиц, находящихся в пристеночной зоне течения, что, в свою очередь, снижает общую величину проскока пылевых частиц. Кроме того, применение коаксиальных вводов позволяет получить некоторое снижение аэродинамического сопротивления пылеуловителей ВЗП, повышая их энергоэффективность.

Предложенная конструкция коаксиального ввода вторичного закрученного потока позволяет решить поставленную задачу. Данный факт подтверждается результатами опытно-промышленных испытаний, результаты которых представлены на рис. 12. Кривая 3, характеризующая функцию проскока пылевых частиц в аппарате с коаксиальным вводом, расположена выше других, что свидетельствует о меньшем проскоке частиц всех фракций.

Таким образом, применение пылеуловителей на встречных закрученных потоках с коаксиальным вторичным вводом на предприятиях по производству железобетонных изделий позволяет добиться высокой степени очистки пылевых выбросов, не прибегая к дорогостоящей замене инерционных пылеуловителей устройствами иных типов.

Список литературы

1. Каздым А.А. Экологические проблемы древности — историческая ретроспектива. *История науки и техники.* 2007;(5):2–17. URL: http://www.heraldrsias.ru/download/articles/06___Article___Zhirkov.pdf (дата обращения: 12.09.2023).

2. Плачкова С.Г. Энергетика. История, настоящее и будущее. В кн. 5. *Электроэнергетика и охрана окружающей среды. Функционирование энергетики в современном мире.* 2011.

3. Akhbarifar Sepideh, Abghari Sorood, Shirvani Mansour, Akhbarifar Sanaz. *Improving dust removal of cyclones* In: Conference (ICEME 2011At). Orlando, Florida, USA: ICEME; 2011.

4. Pitak I., Briankin S., Pitak O., Shaporev V., Petrukhin S. Influence of the inlet flow swirler construction on hydrodynamics and efficiency of work. *Technology audit and production reserves.* 2017;5(3(37)):14–22. http://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112786

5. Nowak K., Bukowska M. Influence of cyclone construction parameters on the efficiency of dust removal. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019;603(5):05209 http://doi.org/10.1088/1757-899X/603/5/052096

6. Азаров В.Н. *Пылеуловители со встречными закрученными потоками.* Монография. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет; 2020. 140 с.

7. Baxodirova M.T., Kurbonov D., Badalov A.A., Jurayev R.R., Bekturdiyev G.K., Mahamatjanov M.A. Efficiency and pressure loss in apparatus with swirling flow. *The herald of KSUCTA.* 2022;76(2):320–325. http://doi.org/10.35803/1694-5298.2022.2.320-325

8. Badalova D.A. Swirling flow for dust capture. In: *E3S Web of Conferences.* 2023;401:03065. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340103065

9. Schauffler E., Zenneck H. *Вихревая камера для отделения твердых и жидких аэрозольных частиц с помощью вспомогательного закручивающего потока газа*. Патент ФРГ, № 1092281. 1953.

10. Кононенко В.Д. *Совершенствование пылеулавливающих аппаратов в промышленности технического углерода.* Москва: ЦНИИТЭнефтехим; 1985. 78 с.

11. Ганчуков В.И., Екимова А.В. *Вихревые аппараты со встречными закрученными потоками.* Череповец: ЧерГУ; 1998. 33 с.

12. Жукова Н.С., Кондратенко Т.О., Шибаков В.А. Анализ конструктивных элементов аппарата ВЗП в инженерно-экологических системах. *Письма в международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология».* 2014;(1):36–38. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-konstruktivnyh-elementov-apparata-vzp-v-inzhenerno-ekologicheskih-sistemah-1/viewer (дата обращения: 19.08.2023).

13. Богуславский Е.И., Азаров В.Н., Сергина Н.М. Математическая модель процесса улавливания в пылеуловителях со встречными закрученными потоками с отсосом из нижней зоны аппарата. В: *Труды Международной науч.-практ. конф. «Экологическая безопасность и экономика городских и теплоэнергетических комплексов».* Волгоград: ВолГАСА; 1999. С. 79–80.

14. Azarov V.N., Lukanin D.V., Borovkov D.P., Redhwan A.M. Experimental study of secondary swirling flow influence on flows structure at separation chamber inlet of dust collector with counter swirling flows. *International Review of Mechanical Engineering (IREME).* 2014;8(5):851–856. https://doi.org/10.15866/ireme.v8i5.3455

15. Sergina N.M., Sakharova A.A., Azarov V.N., Azarov D.V., Nikolenko M.A. Dust emissions' reduction into the atmosphere by environmental-engineering systems of smallsize devices with counter-swirling flows (CSF). In: *E3S Web of Conferences. International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development" (CATPID-2019).* Kislovodsk: E3S Web of Conferences. 2019;38(5):01037. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913801037

16. Stefanenko I.V., Azarov V.N., Borovkov D.P. Experimental optimization of dust collecting equipment parameters of counter swirling flow with coaxial leadthrough for air ventilation system and dust elimination. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* Yurga: Publishing Ltd IOP; 2019;224(1):012037. https://doi.org/10.1088/1755-1315/224/1/012037

17. Лупиногин В.В., Азаров В.Н., Сахарова А.А., Николенко М.А., Ковтунов И.А., Мартынова Е.В. *Вихревой пылеуловитель.* Патент РФ, № 191631. 2019. 6 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU191631U1_20190814.pdf (дата обращения: 24.08.2023).

18. Stefanenko I.V., Azarov V.N., Borovkov D.P., Poliakov I.V. Swirling devices intended for use in air ducts of dust emissions cleaning systems. In: *Proceedings of the International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering "(AIME 2018). Series: Advances in Engineering Research (AER).* Novosibirsk: Atlantis Press; 2018. Vol. 157. P. 60–64. https://doi.org/10.2991/aime-18.2018.12

19. Азаров А.В., Сергина Н.М., Евтушенко А.И., Ковтунов И.А., Стреляева А.Б., Азаров Д.В. *Вихревой пылеуловитель.* Патент РФ, № 202744U1. 2021. 6 с. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/ed/25/2d/2856e5fb81fbb8/RU202744U1.pdf (дата обращения: 25.08.2023).

References

1. Kazdym AA. Ecological problems of antiquity — historical retrospective. *History of Science and Engineering.* 2007;(5):2–17. URL: http://www.heraldrsias.ru/download/articles/06___Article___Zhirkov.pdf (accessed: 12.09.2023). (In Russ.).

2. Plachkova SG. Energetika. Istoriya, nastoyashchee i budushchee. In book 5. *Elektroenergetika i okhrana okruzhayushchei sredy. Funktsionirovanie energetiki v sovremennom mire.* 2011. (In Russ.).

3. Akhbarifar Sepideh, Abghari Sorood, Shirvani Mansour, Akhbarifar Sanaz. Improving dust removal of cyclones. In: *Conference (ICEME 2011At)*. Orlando, Florida, USA: ICEME; 2011.

4. Pitak I, Briankin S, Pitak O, Shaporev V, Petrukhin S. Influence of the inlet flow swirler construction on hydrodynamics and efficiency of work. *Technology audit and production reserves.* 2017;5(3(37)):14–22. http://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112786

5. Nowak K, Bukowska M. Influence of cyclone construction parameters on the efficiency of dust removal. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019;603(5):05209 http://doi.org/10.1088/1757-899X/603/5/052096

6. Azarov VN. *Pyleuloviteli so vstrechnymi zakruchennymi potokami.* Monograph. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2020. 140 p. (In Russ.).

7. Baxodirova MT, Kurbonov D, Badalov AA, Jurayev RR, Bekturdiyev GK, Mahamatjanov MA. Efficiency and pressure loss in apparatus with swirling flow. *The herald of KSUCTA.* 2022;76(2):320–325. http://doi.org/10.35803/1694-5298.2022.2.320-325

8. Badalova DA. Swirling flow for dust capture. In: *E3S Web of Conferences.* 2023;401:03065. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340103065

9. Schauffler E, Zenneck H. *Vikhrevaya kamera dlya otdeleniya tverdykh i zhidkikh aerozol'nykh chastits s pomoshch'yu vspomogatel'nogo zakruchivayushchego potoka gaza.* Patent of West Germany, No. 1092281. 1953. (In Russ.).

10. Kononenko VD. *Sovershenstvovanie pyleulavlivayushchikh apparatov v promyshlennosti tekhnicheskogo ugleroda.* Moscow: TsNIITEneftekhim; 1985. 78 p. (In Russ.).

11. Ganchukov VI, Ekimova AV. *Vikhrevye apparaty so vstrechnymi zakruchennymi potokami.* Cherepovets: CherSU; 1998. 33 p. (In Russ.).

12. Zhukova NS, Kondratenko TO, Shibakov VA. Analysis of structural elements of vortex dust collector with colliding twisted flows in engineering and environmental systems. *Alternative energy and ecology.* 2014;(1):36–38. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-konstruktivnyh-elementov-apparata-vzp-v-inzhenerno-ekologicheskih-sistemah-1/viewer (accessed: 19.08.2023). (In Russ.).

13. Boguslavskii EI, Azarov VN, Sergina NM. Matematicheskaya model' protsessa ulavlivaniya v pyleulovitelyakh so vstrechnymi zakruchennymi potokami s otsosom iz nizhnei zony apparata. In: *Trudy Mezhdunarodnoi nauch.-prakt. konf. "Ekologicheskaya bezopasnost' i ekonomika gorodskikh i teploenergeticheskikh kompleksov".* Volgograd: VolGASA; 1999. P. 79–80. (In Russ.).

14. Azarov VN, Lukanin DV, Borovkov DP, Redhwan AM. Experimental study of secondary swirling flow influence on flows structure at separation chamber inlet of dust collector with counter swirling flows. *International Review of Mechanical Engineering (IREME).* 2014;8(5).851–856. https://doi.org/10.15866/ireme.v8i5.3455

15. Sergina NM, Sakharova AA, Azarov VN, Azarov DV, Nikolenko MA. Dust emissions' reduction into the atmosphere by environmental-engineering systems of smallsize devices with counter-swirling flows (CSF). In: *E3S Web of Conferences. International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development" (CATPID-2019).* Kislovodsk: E3S Web of Conferences. 2019;38(5):01037. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913801037

16. Stefanenko IV, Azarov VN, Borovkov DP. Experimental optimization of dust collecting equipment parameters of counter swirling flow with coaxial leadthrough for air ventilation system and dust elimination. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* Yurga: Publishing Ltd IOP; 2019;224(1):012037. https://doi.org/10.1088/1755-1315/224/1/012037

17. Lupinogin VV, Azarov VN, Sakharova AA, Nikolenko MA, Kovtunov IA, Martynova EV. *Vikhrevoi pyleulovitel'.* Patent RF, No. 191631. 2019. 6 p. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU191631U1_20190814.pdf (accessed: 24.08.2023). (In Russ.).

18. Stefanenko IV, Azarov VN, Borovkov DP, Poliakov IV. Swirling devices intended for use in air ducts of dust emissions cleaning systems. In: *Proceedings of the International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering "(AIME 2018). Series: Advances in Engineering Research (AER).* Novosibirsk: Atlantis Press; 2018. Vol. 157. P. 60–64. https://doi.org/10.2991/aime-18.2018.12

19. Azarov AV, Sergina NM, Evtushenko AI, Kovtunov IA, Strelyaeva AB, Azarov DV. *Vikhrevoi pyleulovitel'.* Patent RF, No. 202744U1. 2021. 6 p. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/ed/25/2d/2856e5fb81fbb8/RU202744U1.pdf (accessed: 25.08.2023). (In Russ.).

Поступила в редакцию 29.09.2023
Поступила после рецензирования 20.10.2023
Принята к публикации 31.10.2023

Об авторах:

Бесарион Чохоевич Месхи, доктор технических наук, профессор, ректор Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 5473-2850, AuthorID, ResearcherID, ScopusID, ORCID

Александр Иванович Евтушенко, кандидат технических наук, доцент, декан факультета промышленного и гражданского строительства Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов–на–Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 7523-1831, AuthorID, ORCID, ScopusID, a.evtushenko@mail.ru

Дмитрий Павлович Боровков, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве Волгоградского государственного технического университета (400074, РФ, г. Волгоград, ул. Академическая, 1), SPIN-код: 4511-5510, AuthorID, ORCID, friggate@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Б.Ч. Месхи — формирование основной концепции, научное руководство.

А.И. Евтушенко — задачи исследования, корректировка выводов.

Д.П. Боровков — анализ результатов исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 29.09.2023
Revised 20.10.2023
Accepted 31.10.2023

About the Authors:

Besarion Ch. Meskhi, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of the Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 5473-2850, Author ID, ORCID, ScopusID

Aleksandr I. Evtushenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Dean of the Industrial and Civil Engineering Faculty, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 7523-1831, AuthorID, ORCID, ScopusID, a.evtushenko@mail.ru

Dmitry P. Borovkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Life Safety in Construction and Urban Economy Department, Volgograd State Technical University (1, Akademicheskaya Str., Volgograd, 400074, RF), SPIN-code: 4511-5510, AuthorID, ORCID, friggate@yandex.ru

Claimed contributorship:

BCh Meskhi: formulation of the basic concept, academic advising.

AI Yevtushenko: research objectives, correction of the conclusions.

DP Borovkov: analysis of the research results.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY



Check for updates

УДК 502/504 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-20-29

Основные научные принципы системного подхода к определению негативных факторов, воздействующих на окружающую среду городских территорий

Н.С. Самарская ✉, **Е.В. Котлярова** , **Е.П. Лысова**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ nat-samars@yandex.ru

Аннотация

Введение. В современных условиях активного развития городских территорий проблемы в области обеспечения экологической безопасности приобретают все большую актуальность. Они не могут быть решены без глубокого анализа факторов, нарушающих экологическое равновесие и вызывающих негативные последствия для компонентов окружающей среды. При этом одним из главных элементов хозяйственно-экономической деятельности человека, формирующей техногенные нагрузки, выступает строительная отрасль. Это связано в том числе с тем, что, в отличие от некоторых других сфер, темпы строительных работ за последний год значительно возросли. Так, на март 2023 года в Российской Федерации зарегистрировано 2460 организаций-застройщиков, что на 14 % больше предыдущего периода, то есть скорость и масштаб строительных работ в настоящее время больше всего затрагивают население городов с социально-экономической стороны. Но при этом нельзя забывать и об экологической стороне вопроса. Многолетний опыт исследований в этой сфере показал отсутствие структурированного подхода к оценке экологической безопасности городских территорий, включающего в себя подбор оптимального перечня природоохранных мероприятий. При этом научные подходы, основанные на экологической характеристике совокупности природных условий, определении предельно допустимых техногенных нагрузок, выявлении экологически значимых параметров окружающей среды, таких как количество кислорода в атмосферном воздухе или наличие естественных водных ресурсов, требуют значительных временных и трудовых затрат, и они, как правило, не привязаны к конкретным объектам городской среды. Однако градостроительные пространства в зависимости от функционального назначения содержат типовые антропогенные объекты, среди которых преобладают объекты капитального строительства и благоустройства территорий. Характер негативного воздействия на окружающую среду таких объектов, очевидно, является тоже типовым. В связи с этим целью данного исследования является систематизация и унификация многочисленных негативных факторов, воздействующих на те или иные территории объекта капитального строительства и благоустройства, в зависимости от функционального назначения и территории, и расположенных на ней объектов. Такие преобразования авторы предлагают производить автоматизировано в рамках разработанной онлайн-платформы.

Материалы и методы. Для оценки негативного воздействия на окружающую городскую среду негативных факторов предлагается использовать методический подход, основанный на концепции функционального зонирования территории. Согласно ГрК РФ, для каждой функциональной зоны характерно наличие определенных объектов капитального строительства и благоустройства. Для достижения поставленной в исследовании цели использованы методы сопоставительного и системного анализа и обобщения. Авторами получены и систематизированы результаты, которые показали схожесть негативных воздействий от одних и тех же типов объектов капитального строительства и благоустройства территорий.

Результаты исследования. Оценка негативного воздействия на окружающую среду объектов капитального строительства и благоустройства территорий является частью научно-исследовательской работы, подготовленной в рамках государственной программы «Приоритет-2030». Системный подход к исследованию негативных факторов городской среды позволит структурировать имеющуюся информацию, значительно ускорить ее анализ и принятие на ее основе соответствующих решений за счет установленных авторами

взаимосвязей между параметрами негативных факторов, типами объектов и функциональными зонами, в которых они расположены. Предлагаемый подход реализуется в рамках разрабатываемой авторами онлайн-платформы. При этом для обеспечения экологической безопасности территории они руководствуются основным принципом, заключающимся в ускоренном проведении автоматизированной оценки негативных факторов, исходящих от объекта капитального строительства или благоустройства городской среды.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты исследований, включающие в себя систематизацию негативных факторов воздействия на окружающую среду территорий объектов капитального строительства и благоустройства в зависимости от функциональных зон их расположения, являются основой для дальнейшей разработки методики обеспечения экологической безопасности городской среды. Максимально полное выявление всех экологически опасных факторов обеспечит возможность всесторонней оценки негативного воздействия на окружающую среду объектов капитального строительства и благоустройства городских территорий.

Ключевые слова: экологическая безопасность, оценка негативного воздействия, окружающая среда, объекты капитального строительства, благоустройство территорий, городская среда

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество. Авторы признательны руководству за помощь, оказанную в процессе подготовки проекта.

Финансирование. Исследования выполнены за счет грантовой поддержки от Донского государственного технического университета по итогам конкурса «Наука-2030».

Для цитирования. Самарская Н.С., Котлярова Е.В., Лысова Е.П. Основные научные принципы системного подхода к определению негативных факторов, воздействующих на окружающую среду городских территорий. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(4):20–29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-20-29

Original article

Main Scientific Principles of a Systematic Approach to the Determination of Negative Factors Affecting Urban Environment

Natalya S. Samarskaya ✉, **Ekaterina V. Kotlyarova**, **Ekaterina P. Lysova**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ nat-samars@yandex.ru

Abstract

Introduction. With the modern active development of urban areas, the problems in the field of environmental safety are becoming increasingly relevant. These problems cannot be solved without an in-depth analysis of the factors that disrupt the ecological balance and cause negative consequences for the components of the environment. At the same time, construction industry is one of the main elements of human economic activity that forms technogenic loads. This is due, among other things, to the fact that, unlike some other areas, the pace of construction work has increased significantly over the past year. So, as of March 2023, 2,460 developer organizations were registered in the Russian Federation, which was 14% more than in the previous period, that is, the speed and scale of construction work most of all affect the population of cities from a socio-economic point of view. At the same time, we should not forget about the environmental side of the issue. Many years of research in this area has shown the lack of a structured approach to assessing the environmental safety of urban areas, including the selection of an optimal list of environmental measures. At the same time, scientific approaches based on the ecological characteristics of the totality of natural conditions, determining the maximum permissible anthropogenic loads, identifying environmentally significant environmental parameters, such as the amount of oxygen in the atmospheric air or the availability of natural water resources, require significant time and labor costs, and also, as a rule, are not tied to specific objects of the urban environment. However, urban planning spaces, depending on their functional purpose, contain typical anthropogenic objects, among which capital construction and landscaping facilities predominate. The nature of the negative impact on the environment from such facilities is obviously also typical. In this regard, the aim of the study was to systematize and unify numerous negative factors affecting the territory of a particular object of capital construction and landscaping, depending on the functional purpose of the territory and the types of objects located on it. The authors propose to perform such transformations automatically within the framework of the developed online platform.

Materials and Methods. To assess the negative impact on the urban environment, it was proposed to use a methodological approach based on the concept of functional zoning of the territory. According to the Urban Planning

Code of the Russian Federation, each functional zone is characterized by the presence of certain capital construction and landscaping facilities. To achieve this goal, we used methods of comparative and system analysis and generalization. Thus, the results were obtained and systematized in the work, which showed the similarity of the nature of the negative impact from the same types of capital construction and landscaping facilities.
Results. The assessment of the negative impact of capital construction and landscaping facilities on the environment was part of the research work prepared within the framework of the state program "Priority 2030". A systematic approach in analytical studies of negative factors of urban environment will allow structuring information, significantly speeding up its analysis and making appropriate decisions due to the relationships we have established between the parameters of negative factors, types of objects and functional zones in which they were located. The proposed approach was implemented within the framework of the online platform developed by the authors. At the same time, the main principle that guided us was quick access to the task of ensuring environmental safety of the territory due to accelerated automated assessment of negative factors from a given capital construction object or urban improvement.
Discussion and Conclusion. The obtained research results, which include the systematization of negative environmental impact factors on the territories of capital construction and landscaping facilities, depending on the functional zones of their location, are the basis for further development of methods for ensuring environmental safety of the urban environment. The fullest possible identification of all environmentally hazardous factors will ensure an effective assessment of the negative impact on the environment of capital construction projects and urban improvement.

Keywords: environmental safety, negative impact assessment, environment, capital facilities, landscaping, urban environment

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article. The authors are grateful to the management for the assistance provided during the preparation of the project.

Funding information. The research was carried out at the expense of grant support from Don State Technical University following the results of the Science-2030 competition.

For citation. Samarskaya NS, Kotlyarova EV, Lysova EP. Main Scientific Principles of a Systematic Approach to the Determination of Negative Factors Affecting Urban Environment. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(4):20–29. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-20-29

Введение. Развитие общества неразрывно связано с формированием соответствующей среды обитания. Научно-технический прогресс, открытия в различных сферах жизнедеятельности, повсеместное использование механизмов позволили расширять ареолы обитания человека даже на трудных для освоения участках. При этом о возможном негативном воздействии на окружающую среду в процессе хозяйственно-экономической деятельности стали говорить чуть более ста лет назад, а термин «устойчивое развитие» и его принципы были впервые сформулированы в 1972 году.

В настоящее время вопрос обеспечения экологической безопасности как в целом среды обитания человека, так и отдельных сфер жизни или деятельности является крайне актуальным и обсуждаемым. По мнению авторов, это связано с тем, что до сих пор отсутствует удобная системная методика подбора природоохранных мероприятий для объектов капитального строительства и городского хозяйства. И первым шагом для ее описания является систематизация негативных факторов воздействия на компоненты окружающей среды. При этом анализ экологических проблем показывает, что наиболее ярко они проявляются прежде всего в городской среде, там, где происходит замещение естественных биогеоценозов урбо- и агроценозами, а также появляются глубокие неразрывные взаимосвязи между природными компонентами и элементами высокоурбанизированных территорий. Под высокоурбанизированными территориями авторы данной работы понимают территории мегаполисов, городских агломераций, крупных городов. Такие формы поселений занимают значительную часть суши, на них сосредоточена большая часть населения Земли.

Спектр воздействия высокоурбанизированных территорий на окружающую среду оказывается чрезвычайно широким, с максимальной концентрацией негативно воздействующих факторов. Однако, как показывает практика, в проектной документации на объекты капитального строительства и благоустройства территорий прописывается не весь спектр негативно воздействующих факторов, и, как следствие, предусмотренные проектные мероприятия по защите окружающей среды не дают должного эффекта, так как опираются на типовые решения, копируемые из проекта в проект.

Материалы и методы. Изучению подходов к решению вопросов обеспечения экологической безопасности городских территорий посвящены труды таких отечественных и зарубежных ученых, как Ветрова Н.М.,

Вереха Т.В., Беспалова В.И., Герасимова Е.Б., Гагарина Е.С., Махмуди А., Шеина С.Г. и другие, включая авторов данного научного материала [1, 2]. Результаты исследований показывают, что крупный мегаполис практически полностью изменяет природные компоненты: атмосферный воздух, почвенный покров, фитоценоз, рельеф, поверхностные и подземные воды, климат [3–5]. Появляются неразрывные связи между элементами городской среды и природными компонентами. Так, типичным примером может служить городская улица, где антропогенными элементами являются здания, автомобильный транспорт, дорожное покрытие, а природными компонентами выступают зеленые насаждения и атмосферный воздух [6, 7]. Такая связь неизбежно приводит к негативному воздействию элементов городской среды на природные компоненты, причем спектр этого воздействия оказывается настолько широким, что вызывает целый ряд проблем, характерных практически для любого современного города [8]. Для достижения поставленной цели авторами использованы методы сопоставительного и системного анализа и обобщения. Обобщая и систематизируя результаты проведенных аналитических исследований, можно представить всю совокупность наиболее острых экологических проблем современного города в виде схемы (рис. 1).

Такое многообразие выявленных проблем обусловлено прежде всего особенностью городской инфраструктуры [9, 10]. В ее состав входят не только промышленные кластеры и селитебные зоны с высокой плотностью застройки, но и торгово-развлекательные комплексы, объекты городского хозяйства и рекреационные зоны. В комплексе все элементы городской среды должны обеспечивать благоприятные условия для проживания населения. Одновременно с обеспечением благоприятных условий для проживания элементы городской среды не должны оказывать негативного воздействия на природные экосистемы. Поэтому неизбежное тесное взаимодействие совокупности живых существ и высокоурбанизированной среды порождает взаимозависимость и формирует особую форму экосистемы — урбанизированную.

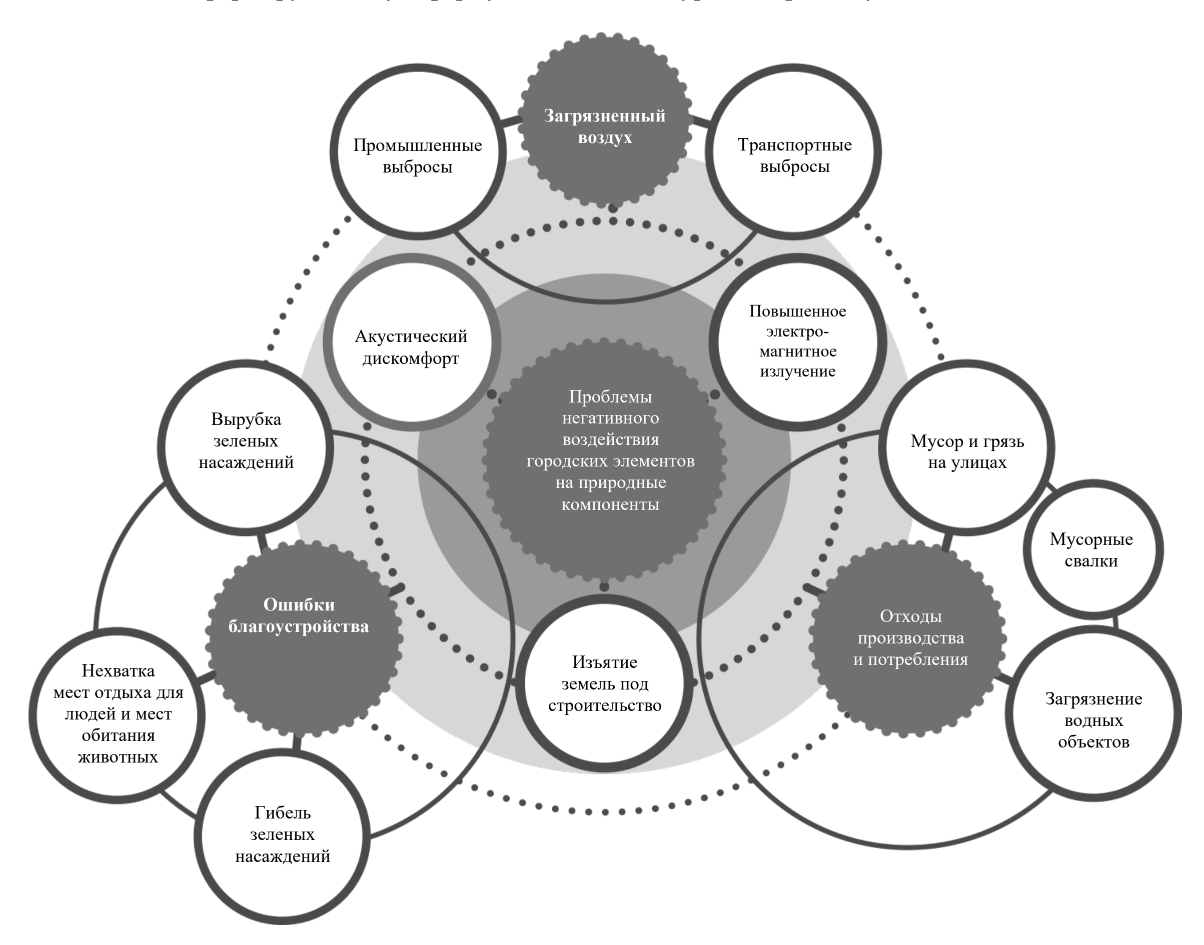


Рис. 1. Проблемы негативного воздействия городских элементов на природные компоненты окружающей среды

Очевидно, что урбанизированная экологическая система постоянно потребляет внешние ресурсы и не способна к саморегуляции. Такая система развивается не по законам природы, а согласно потребностям хозяйственной деятельности человека. Именно поэтому подход к решению проблемы обеспечения равновесия в урбанизированной экосистеме должен быть особым, учитывающим все параметры свойств природных и антропогенных компонентов городской среды.

Результаты исследования. Понятие «негативный фактор, воздействующий на окружающую городскую среду» подразумевает прежде всего специфику процесса его воздействия на окружающие компоненты, в ходе которого появляются признаки негативного изменения. Каждый процесс негативного изменения имеет свои особенности воздействия и определяется по характеру, интенсивности, источнику [11]. Однако сравнительный анализ особенностей воздействия негативных факторов на окружающую городскую среду позволил систематизировать их по характеру влияния на природные компоненты урбанизированных территорий.

Неизбежным и, пожалуй, наиболее негативным фактором в городской среде является использование земель как пространственного базиса для строительства и размещения объектов хозяйственной деятельности. В зависимости от характера использования земля подвергается истощению, переуплотнению, загрязнению, подтоплению и пр. Экологические требования, изложенные в главе VII закона «Об охране окружающей среды» относительно размещения объектов хозяйственной деятельности, их проектирования, строительства и реконструкции, а также ввода в эксплуатацию, не обеспечивают в полной мере равновесия в урбанизированной экосистеме и приводят к вышеописанным последствиям.

Повсеместное загрязнение природных компонентов в процессе функционирования урбанизированных экосистем связано с активным ростом и развитием промышленности, транспортных систем, строительством объектов энергетики и, конечно, жилой площади [12, 13]. Безусловно, степень влияния источников загрязнения бывает разной и зависит от уровня благоустройства городских микрорайонов и целого ряда социально-экономических факторов: законодательных, политических, демографических, личностных, инфраструктурных [14, 15].

Говоря об источниках загрязнения окружающей среды урбанизированных территорий химическими веществами, можно предположить, что наиболее значимыми из них являются объекты и инфраструктура автотранспортного комплекса. При пробеге 15 тыс. км один автомобиль сжигает в среднем 2 т топлива, около 30 т воздуха, в том числе 4–5 т кислорода, что в 50 раз больше потребностей человека, при этом выбрасывает в атмосферный воздух городов угарного газа — 700 кг/год, диоксида азота — 40 кг/год, углеводородов — 230 литров, твердых веществ — 2–5 кг/год [16, 17].

Анализ результатов многолетних наблюдений и исследований позволяет заключить, что наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха высокоурбанизированных территорий вносят автомобили, работающие на бензине, в меньшей степени — работающие на дизельном топливе, минимальный вклад — работающие на газообразном топливе [1, 2, 8].

Загрязнение, как негативный фактор воздействия на городскую экосистему, в значительной степени поступает и от промышленных объектов, максимальное количество которых сосредоточено именно на высокоурбанизированных территориях и территориях, непосредственно прилегающих к ним [10].

Установлено, что основными источниками загрязнения среди промышленных объектов, являются [7, 10]

– на предприятиях черной и цветной металлургии — дробильно-размольное оборудование, места разгрузки, погрузки и пересыпки материалов, доменные и мартеновские печи, установки непрерывной разливки металлов и другие;

– на химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях — технологическое оборудование при производстве кислот, резинотехнических изделий, пластмасс, красителей и моющих средств, искусственного каучука, минеральных удобрений, различных растворителей (толуола, ацетона, фенола, бензола), при получении фосфора;

– на предприятиях по производству строительных материалов — обжиговые печи, сушильные барабаны различных видов, реакторы гашения извести, дробильно-размольное оборудование, сушильные машины, стекловаренные печи, битумоплавильные агрегаты, сортировочные машины, сушильные агрегаты, смесители, агрегаты питания и др.

Как показывают результаты мониторинга качества компонентов окружающей среды на территориях вблизи размещения вышеуказанных объектов, степень негативного влияния загрязняющих веществ зачастую превышает в несколько раз установленные нормативами значения [12]. Говоря о загрязняющих веществах, приоритетных по уровню содержания в атмосфере городской среды, следует, безусловно, отметить оксид и диоксид углерода, оксиды азота и серы, ароматические углеводороды, твердые вещества, в том числе неорганические, с различным содержанием диоксида кремния, соединения свинца, хрома, ванадия, ртути и других химических элементов, хлорорганические вещества, фенол, бензол и его гомологи, формальдегид, аммиак, бенз(а)пирен, сероводород, сероуглерод, летучие органические соединения, пестициды [13]. Все это подтверждает факт недостаточности или неэффективности предусмотренных организационных, технологических и специальных инженерно-экологических мероприятий, призванных обеспечивать экологическую безопасность урбанизированной территории.

Несмотря на активное развитие принципов зеленой урбанистики, в крупных городах по-прежнему наблюдается нехватка зеленых насаждений и ухудшается состояние существующих посадок. Это проявляется

в нарушении продукционного процесса, деформации и изреживании кроны, прогрессировании суховершинности, а также некрозов и хлорозов листьев и хвои. Такие процессы происходят не только из-за загрязнения компонентов городской среды, но и из-за снижения плодородия почв, их уплотнения и загрязнения. Авторами выявлено, что данные негативные факторы особо интенсивно проявляются в районах многоэтажной застройки. Поэтому, решая проблему озеленения урбанизированных микрорайонов, необходимо исследовать и учитывать целый комплекс негативных факторов, угнетающих растительность и, как следствие, приводящих к потере ее экологических функций. Зеленые насаждения, лишенные своих качеств, не только бесполезны для обеспечения равновесия в урбоэкосистеме, но и эстетически тяжелы для восприятия.

Наряду с вышеперечисленными негативными факторами окружающая городская среда подвержена интенсивному воздействию различных физических полей: акустического, вибрационного, электромагнитного, теплового, радиационного [6, 7]. При этом акустический дискомфорт создают прежде всего объекты транспортной системы: авиа-, железнодорожный, автомобильный и водный транспорт. Существенный вклад в акустическое загрязнение урбанизированной среды вносят спортивные и развлекательные объекты, объекты промышленного кластера и ЖКХ. Многолетними исследованиями также установлено, что городские источники шума создают в совокупности сверхнормативный акустический фон, который негативно сказывается на здоровье проживающего на данной территории населения [5].

Как правило, негативный акустический фон в городской среде усиливает вибрационное воздействие от городского рельсового и автомобильного транспорта. Известно, что продолжительное регулярное вибрационное воздействие на живые компоненты окружающей среды приводит в смене местообитания организмов и разрушающе действует на центральную нервную систему человека [14].

Еще одним значимым негативным фактором в высокоурбанизированной городской среде является электромагнитное поле. Источниками могут служить электроснабжающие комплексы, протяженные линии электропередачи, ТЭЦ и трансформаторные подстанции, базовые станции сотовой связи, телевизионные комплексы, радиолокационные установки, радиостанции [15].

Наряду с электромагнитным полем на урбанизированную среду негативно воздействует тепловое поле. Избыток теплоты в городской среде возникает от таких объектов, как ТЭЦ, АЭС, котельные, теплотрассы, объекты добычи и переработки нефти, металлургические заводы, транспортные средства, метрополитены, подземные обогреваемые сооружения [16].

Наиболее опасным видом физического загрязнения в городской среде выступает радиоактивное излучение, которое в обычных условиях развития городской инфраструктуры не проявляется. Риск появления данного фактора возникает в период ликвидации техногенных аварий на объектах ядерной и атомной энергетики. Однако в последние годы вопросу обеспечения безопасности такого рода промышленных объектов уделяется большое внимание, поэтому вероятность появления фактора радиоактивного излучения остается минимальной.

Самым неконтролируемым негативным фактором в высокоурбанизированной среде можно считать биологическое загрязнение, связанное с появлением и распространением патогенных микроорганизмов в атмосферном воздухе, в водных объектах или в почве, приводящее к угрозе появления всевозможных изменений в здоровье населения, вспышке эпидемий. Основными источниками патогенных микроорганизмов выступают объекты водоотводящих и водоснабжающих комплексов, пункты общественного питания, кладбища, медицинские и лабораторные учреждения, сельскохозяйственные предприятия [17].

Представленное выше подробное описание видов негативных факторов, воздействующих на окружающую среду городских территорий, показывает, с одной стороны, многообразие типов воздействий, а с другой — необходимость построения взаимосвязей и систематизации перечисленных параметров для возможности автоматизированной работы с ними.

В ходе исследования влияния негативных факторов на окружающую среду города и последующего измерения диапазонов их воздействия авторами проведен анализ функциональных зон типичной городской территории с целью выявления источников (объектов) появления таких негативных факторов. Проведенные аналитические исследования показали большое разнообразие факторов, способных негативно воздействовать на окружающую среду высокоурбанизированных территорий. Предлагаемый авторами системный подход позволяет структурировать информацию, ускорить ее анализ и принимать соответствующие решения при последующем подборе природоохранных мероприятий для каждого конкретного случая. При этом основным принципом, которым руководствовались авторы, является оперативное решение задачи обеспечения экологической безопасности территории того или иного объекта строительства или благоустройства.

Любая задача предполагает наличие массива исходных данных, который должен обеспечить полное представление о предполагаемом ходе решения проблемы. В рассматриваемой ситуации в состав массива исходных данных, очевидно, должна входить такая информация, как реализуемый процесс, в результате

которого необходимо обеспечить экологическую безопасность (строительство или эксплуатация), наименование объекта исследования (промышленное предприятие, торговый центр, гостиница, автомойка, железнодорожный вокзал и т. д.), функциональная зона, в которой данный объект размещен (планируется к размещению), перечень негативных факторов воздействия рассматриваемого объекта на компоненты окружающей среды (физическое, химическое, биологическое воздействие). В связи с этим структурирование такого рода информации целесообразно проводить методом взаимосвязанной иерархии функциональных зон и относящихся к ним объектов строительства и капитального ремонта с негативными факторами, воздействующими на территории объектов, и их параметрами (рис. 2).

При таком методе построение многоуровневой системы данных с помощью программного комплекса позволит представить визуально большой массив данных достаточно легко и наглядно. Весь путь, представленный на рис. 2, можно автоматизировать, предоставив аналитическую задачу программному комплексу. Последовательно пройдя несколько шагов, пользователь сможет быстро прийти к цели — получить набор тех негативных факторов воздействия на окружающую среду, которые характерны именно для его конкретного объекта, расположенного в определенной функциональной зоне города.

Полученный исчерпывающий набор негативных факторов позволяет определить дальнейшие пути работы: проведение инструментальных замеров для определения параметров их воздействия с последующим детализированным подбором списка природоохранных мероприятий либо получение рекомендаций по перечню возможных мероприятий по снижению негативного воздействия на компоненты окружающей среды без проведения замеров.

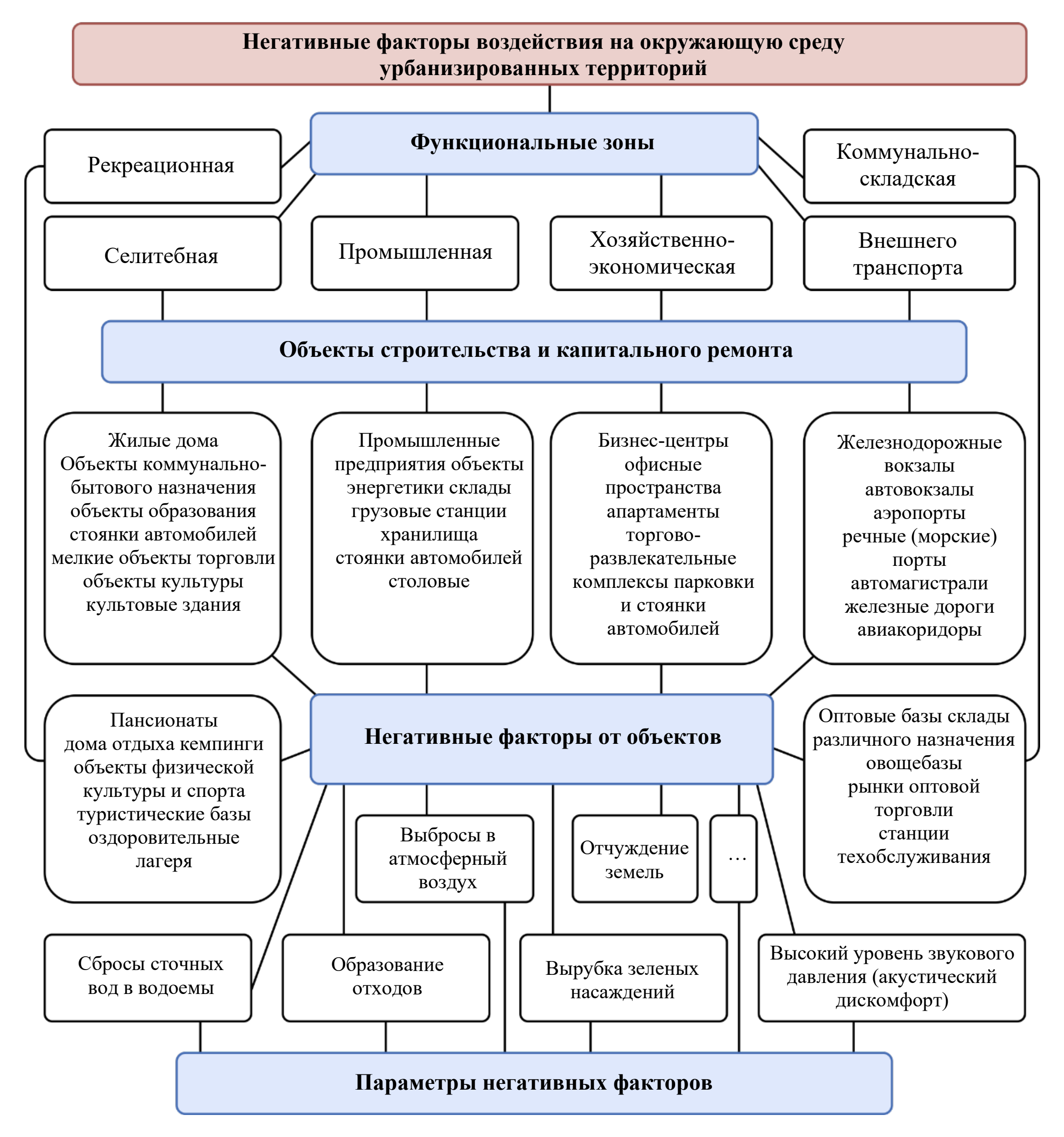


Рис. 2. Системный подход к оценке негативного воздействия на окружающую среду территорий объектов капитального строительства и благоустройства в зависимости от функциональных зон, где они расположены

Обсуждение и заключение. Обеспечение экологической безопасности является важным условием повсеместного развития общества, поэтому необходимо снижать негативное воздействие на окружающую среду от различных видов хозяйственно-экономической деятельности человека, включая весь спектр строительных работ. Решение проблем экологической безопасности урбанизированных территорий базируется на глубоком анализе факторов, нарушающих экологическое равновесие и вызывающих негативные последствия в окружающей среде. В современных условиях развития электронных продуктов создание программного комплекса, реализующего предлагаемый авторами системный подход к определению негативных факторов, воздействующих на территории объектов капитального строительства и благоустройства с учетом функциональных зон, где они расположены, представляется весьма перспективным. Сформированный массив данных, содержащий информацию о негативных факторах окружающей среды от функционирования различных объектов капитального строительства и городского хозяйства, позволит оптимизировать подбор природоохранных мероприятий для каждого конкретного случая, сокращая временные затраты за счет автоматизации процесса. Внедрение и реализация подобных мер будут способствовать сбалансированному развитию городской среды и повышению качества жизни жителей.

Список литературы

1. Ветрова Н.М., Вереха Т.В., Меннанов Э.Э. Судьева Д.В. Экологическая безопасность урбанизированных рекреационных территорий в зоне влияния объектов транспортного строительства. *Экономика строительства и природопользования*. 2022;(1–2)(82–83):145–151. URL: https://science.cfuv.ru/wpcontent/uploads/2022/07/%D-0%92%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0.pdf (дата обращения: 20.08.2023).

2. Герасимова Е.Б., Мельникова Л.А., Лосева А.В. Экологическая безопасность строительства в моногородах. *Строительные материалы и изделия.* 2023;6(3):59–78. https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-3-59-78

3. Sharmilaa G., Ilango T. Vehicular air pollution based on traffic density — A case study. *Materialstoday: proceedings.* 2022;52(3):532–536. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.278

4. Sheng Li, Hu Jian, Ling Zhou, Li Qiu. A multiple case study on the cooperative governance model of treating environmental deterioration. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment.* 2021;19(1):56–64. https://doi.org/10.1016/j.cjpre.2021.12.006

5. Махмуди А. *Архитектурное построение многоэтажных жилых домов по правилу сочетаемости биосферной парадигмы*. Монография. Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии; 2022. 142 с. URL: https://publishing.intelgr.com/index.php/izdannye-raboty?id=200 (дата обращения: 15.09.2023).

6. Коровина В.С. Природные источники загрязнения окружающей среды. *Научно-исследовательский центр Technical Innovations*. 2021;1:22–25.

7. Samarskaya N., Gurova O. Investigation of the process of reducing air pollution when crushing gravel. In: *E3S Web of Conferences.* 2021;281:09021. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128109021

8. Can Trong Nguyen, Amnat Chidthaisong, Atsamon Limsakul, Pariwate Varnakovida, Chaiwat Ekkawatpanit, Phan Kieu Diem, Nguyen Thi Hong Diep. How do disparate urbanization and climate change imprint on urban thermal variations? A comparison between two dynamic cities in Southeast Asia. *Sustainable Cities and Society.* 2022;82:103882. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103882

9. Тускаева З.Р., Фарниев О.У. Оценка экологической безопасности зданий. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия.* 2021;3(37):16–21. URL: https://xn--80aai1dk.xn--p1ai/journal/wp-content/uploads/2021/09/isvp_3_37_2021_16-21.pdf (дата обращения: 10.09.2023).

10. Дьячкова О.Н. Принципы стратегического планирования развития «зеленой» инфраструктуры городской среды. *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2021;16(8):1045–1064. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.8.1045-1064

11. Timothy G. Holloway, John B. Williams, Djamila Ouelhadj, Gong Yang. Exploring the use of water resource recovery facility instrument data to visualise dynamic resilience to environmental stressors. *Water Research.* 2022;221:118711. https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118711

12. Meric Yilmaz Salman, Halil Hasar. Review on environmental aspects in smart city concept: Water, waste, air pollution and transportation smart applications using IoT techniques. *Sustainable Cities and Society.* 2023;94(4):104567. http://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104567

13. Iñigo Delgado-Enales, Javier Del Ser, Patricia Molina-Costa. A framework to improve urban accessibility and environmental conditions in age-friendly cities using graph modeling and multi-objective optimization. *Computers, Environment and Urban Systems.* 2023;102:101966. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2023.101966

14. Гагарина Е.С. Зеленая инфраструктура и экосистемные услуги в устойчивом развитии городов. *Архитектура и современные информационные технологии*. 2023;1(62):228–247. https://doi.org/10.24412/1998-4839-2023-1-228-247

15. Плуготаренко Н.К., Гусакова Н.В., Долгополова А.Г. Методы обеспечения экологической безопасности городов. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2018;(3–4):94–102. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2018-3-4-94-102

16. Акимова А.С., Филиппова Л.С. Проблема загрязнения поверхностных и сточных вод нефтью и нефтепродуктами и пути ее решения. *Международный научно-исследовательский журнал.* 2023;3(129):1–4. https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.129.63

17. Бондаренко М.Б. Градостроительное зонирование как правовой инструмент обеспечения устойчивого развития населенных пунктов. *Новизна. Эксперимент. Традиции.* 2022;8(1):8–14. URL: https://www.nxtjournal.ru/jour/article/view/139/66 (дата обращения: 10.09.2023).

References

1. Vetrova NM, Verekha TV, Mennanov EE, Sud'yeva D.V. Ekologicheskaya bezopasnost' urbanizirovannykh rekreatsionnykh territorii v zone vliyaniya ob"ektov transportnogo stroitel'stva. *Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya*. 2022;(1–2)(82–83):145–151. URL: https://science.cfuv.ru/wpcontent/uploads/2022/07/%D0-%92%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0.pdf (accessed: 20.08.2023). (In Russ.).

2. Gerasimova EB, Melnikova LA, Loseva AV. Ecological safety of construction in single-industry town. *Construction Materials and Products*. 2023;6(3):59–78. https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-3-59-78 (In Russ.).

3. Sharmilaa G, Ilango T. Vehicular air pollution based on traffic density – A case study. *Materialstoday: proceedings*. 2022;52(3):532–536. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.278

4. Sheng Li, Hu Jian, Ling Zhou, Li Qiu. A multiple case study on the cooperative governance model of treating environmental deterioration. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*. 2021;19(1):56–64. https://doi.org/10.1016/j.cjpre.2021.12.006

5. Makhmudi A. *Arkhitekturnoe postroenie mnogoetazhnykh zhilykh domov po pravilu sochetaemosti biosfernoi paradigmy*. Monograph. Saint-Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2022. 142 p. URL: https://publishing.intelgr.com/index.php/izdannye-raboty?id=200 (accessed: 15.09.2023). (In Russ.).

6. Korovina VS. Prirodnye istochniki zagryazneniya okruzhayushchei sredy. *Nauchno-issledovatel'skii tsentr Technical Innovations*. 2021;1:22–25. (In Russ.).

7. Samarskaya N, Gurova O. Investigation of the process of reducing air pollution when crushing gravel. In: *E3S Web of Conferences*. 2021;281:09021. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128109021

8. Can Trong Nguyen, Amnat Chidthaisong, Atsamon Limsakul, Pariwate Varnakovida, Chaiwat Ekkawatpanit, Phan Kieu Diem, et al. How do disparate urbanization and climate change imprint on urban thermal variations? A comparison between two dynamic cities in Southeast Asia. *Sustainable Cities and Society*. 2022;82:103882. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103882

9. Tuskaeva ZR, Farniev OU. Assessment of environmental safety of buildings. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2021;3(37):16–21. https://doi.org/10.52684/2312-3702-2021-37-3-16-21 (In Russ.).

10. D'yachkova ON. Principles of strategic planning for the development of "green" infrastructure of the urban environment. *Vestnik MGSU*. 2021;16(8):1045–1064. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.8.1045-1064 (In Russ.).

11. Holloway TG, Williams JB, Djamila Ouelhadj, Gong Yang. Exploring the use of water resource recovery facility instrument data to visualise dynamic resilience to environmental stressors. *Water Research*. 2022;221:118711. https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118711

12. Meric Yilmaz Salman, Halil Hasar. Review on environmental aspects in smart city concept: Water, waste, air pollution and transportation smart applications using IoT techniques. *Sustainable Cities and Society*. 2023;94:104567. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104567

13. Iñigo Delgado-Enales, Javier Del Ser, Patricia Molina-Costa. A framework to improve urban accessibility and environmental conditions in age-friendly cities using graph modeling and multi-objective optimization. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2023;102:101966. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2023.101966

14. Gagarina ES. Green infrastructure and ecosystem services in sustainable urban development. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2023;1(62):228–247. https://doi.org/10.24412/1998-4839-2023-1-228-247 (In Russ.).

15. Plugotarenko NK, Gusakova NV, Dolgopolova AG. Methods for ensuring environmental safety of cities. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2018;(3–4):94–102. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2018-3-4-94-102 (In Russ.).

16. Akimova AS, Filippova LS. The problem of surface water and wastewater pollution by oil and oil products and ways of its solution. *International Research Journal*. 2023;3(129):1–4. https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.129.63 (In Russ.).

17. Bondarenko MV. Urban zoning as a legal instrument for ensuring sustainable development of settlements. *Novelty. Experiment. Traditions (N.Ex.T)*. 2022;8(1):8–14. URL: https://www.nxtjournal.ru/jour/article/view/139/66 (accessed: 10.09.2023). (In Russ.).

Поступила в редакцию 25.09.2023
Поступила после рецензирования 10.10.2023
Принята к публикации 23.10.2023

Об авторах:

Наталья Сергеевна Самарская, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ResearcherID, AuthorID, ORCID, nat-samars@yandex.ru

Екатерина Владимировна Котлярова, кандидат экономических наук, доцент института опережающих технологий «Школа Икс» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, AuthorID, ORCID, ekkot.arch@gmail.com

Екатерина Петровна Лысова, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ResearcherID, AuthorID, ORCID, katerina.lysova0803@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Н.С. Самарская — формирование концепции и текста статьи.

Е.В. Котлярова — выбор тематики, обоснование актуальности и направления исследования, корректировка текста, руководство научно-исследовательской работой в рамках программы «Приоритет-2030».

Е.П. Лысова — выполнение исследований, подготовка рекомендаций и корректировка текста, анализ результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 25.09.2023
Revised 10.10.2023
Accepted 23.10.2023

About the Authors:

Natalya S. Samarskaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Environmental Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ResearcherID, AuthorID, ORCID, nat-samars@yandex.ru

Ekaterina V. Kotlyarova, Cand. Sci. (Econom.), Associate Professor of the Institute of Advanced Technologies "School X", Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, AuthorID, ORCID, ekkot.arch@gmail.com

Ekaterina P. Lysova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Environmental Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ResearcherID, AuthorID, ORCID, katerina.lysova0803@gmail.com

Claimed contributorship:

NS Samarskaya: formulation of the concept and text of the article.

EV Kotlyarova: selection of the topic, justification of the relevance and direction of the study, correction of the text, management of research work within the framework of the Priority 2030 program.

EP Lysova: research, preparation of recommendations and correction of the text, analysis of the results.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 614.84
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-30-39

Научная статья

Анализ расхода воды при тушении пожаров на объектах разных классов функциональной пожарной опасности

А.А. Кондашов ✉, **Е.В. Бобринев**, **Е.Ю. Удавцова**, **С.И. Рюмина**
Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха, Российская Федерация
✉ akond2008@mail.ru

Аннотация
Введение. Системы противопожарного водоснабжения играют первостепенную роль в обеспечении эффективного тушения пожаров. Требования к противопожарному водоснабжению и проблемные вопросы в этой области рассматривались многими исследователями как в нашей стране, так и за рубежом. В то же время для актуализации требований к противопожарному водоснабжению необходимо изучение фактического расхода воды на пожарах с учетом особенностей объектов пожара. Целью настоящего исследования является анализ расхода воды на наружное пожаротушение в зависимости от характеристик объекта пожара и сравнение фактического расхода воды с требованиями нормативных документов по пожарной безопасности.
Методы и материалы. Использованы статистические данные о пожарах в Российской Федерации за 2019–2021 годы, содержащиеся в федеральной государственной информационной системе «Федеральный банк данных «Пожары». Для определения фактического расхода воды на наружное пожаротушение в зависимости от класса функциональной пожарной опасности объекта пожара использованы методы статистического анализа данных и классификации статистических данных. Визуализация полученных результатов выполнена методом графического представления данных в виде гистограмм и круговых диаграмм.
Результаты исследования. Проведенный анализ показал, что наибольший средний расход воды требуется для объектов класса функциональной пожарной опасности Ф1.2 «гостиницы, общежития (за исключением общежитий квартирного типа), спальные корпуса санаториев и домов отдыха общего типа, кемпингов» — 10,7 л/с. Для многоквартирных жилых домов наибольший средний расход воды требуется для тушения пожаров, возникших на чердаке — 10 л/с и в мансарде — 9,2 л/с.
Обсуждение и заключение. Результаты проведенного анализа могут быть использованы для уточнения требований к расходу воды на наружное пожаротушение в зависимости от класса функциональной пожарной опасности объекта и этажности зданий. Для выполнения данных требований необходим регулярный контроль систем противопожарного водоснабжения, а также своевременное обслуживание и ремонт наружных и внутренних водопроводов противопожарного водоснабжения.

Ключевые слова: расход воды, пожар, функциональная пожарная опасность, здание, этажность

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Кондашов А.А., Бобринев Е.В., Удавцова Е.Ю., Рюмина С.И. Анализ расхода воды при тушении пожаров на объектах разных классов функциональной пожарной опасности. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(4):30–39. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-30-39

Original article

Analysis of Water Consumption during Fire Extinguishing at Objects of Different Functional Fire Hazard Classes

Andrey A. Kondashov ✉, **Evgeniy V. Bobrinev**, **Elena Yu. Udavtsova**, **Svetlana I. Ryumina**
All-Russian Research Institute of Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Russian Federation
✉ akond2008@mail.ru

Abstract
Introduction. Fire-fighting water supply systems play a primary role in ensuring effective fire extinguishing. Many researchers both in our country and abroad have considered the requirements for fire-fighting water supply and problematic issues in this area. At the same time, in order to update the requirements for fire-fighting water supply, it is necessary to study the actual water consumption on fires, taking into account the characteristics of fire objects. The aim of this research was to analyze the water consumption for outdoor firefighting depending on the characteristics of the fire object and compare the actual water consumption with the requirements of regulatory documents on fire safety.
Methods and Materials. The authors used statistical data on fires in the Russian Federation for 2019–2021 from the federal state information system "Federal Database "Fires". Methods of statistical data analysis and classification of statistical data were used to determine the actual water consumption for outdoor firefighting, depending on the class of functional fire hazard of the fire object. Visualization of the obtained results was performed by the method of graphical representation of data in the form of histograms and pie charts.
Results. The analysis showed that the highest average water consumption was required for objects of the functional fire hazard class F1.2 "hotels, dormitories (with the exception of apartment-type dormitories), dormitory buildings of sanatoriums and rest homes of general type, campsites" — 10.7 l/s. For apartment buildings, the highest average water consumption was required to extinguish fires that had arisen in the attic — 10 l/s and in the garret — 9.2 l/s.
Discussion and Conclusion. The results of the analysis can be used to clarify the requirements for water consumption for outdoor firefighting, depending on the functional fire hazard class of the object and the number of floors of buildings. In order to meet these requirements, regular monitoring of fire-fighting water supply systems is required, as well as timely maintenance and repair of external and internal fire-fighting water supply systems.

Keywords: water consumption, fire, functional fire hazard, building, number of floors

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Kondashov AA. Bobrinev EV, Udavtsova EYu, Ryumina SI. Analysis of Water Consumption during Fire Extinguishing at Objects of Different Functional Fire Hazard Classes. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):30–39. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-30-39

Введение. Задача определения необходимого расхода воды на наружное пожаротушение имеет первостепенное значение для обеспечения эффективных действий оперативных подразделений пожарной охраны при тушении пожаров. Данные о расходе воды на наружное пожаротушение используются при определении состава сил и средств оперативных подразделений пожарной охраны, составлении планов тушения пожаров, определении требований к системам наружного противопожарного водоснабжения.

Проблемы, связанные с подачей воды в системы наружного противопожарного водоснабжения, рассматривались многими исследователями [1–4]. В частности, Зайко В.А., Ильин Н.А., Саргсян А.М особое внимание уделили вопросам организации тушения пожаров в малых населенных пунктах, где, как правило, отсутствуют системы противопожарного водоснабжения и не всегда обеспечивается быстрое прибытие специальной пожарной техники [5]. Абросимов Ю.Г., Киселев Л.Ю. пришли к выводу о необходимости разработки новых нормативов и корректировки действующих нормативных документов в части расчетного времени тушения и расходов воды на пожаротушение для городов с населением более миллиона человек [6]. Чудаков А.А., Метелкин И.И., Шумилин В.В. проанализировали имеющиеся сведения о гидротехнических сооружениях, предназначенных для противопожарных целей [7]. Калач А.В., Родин В.А., Синегубов С.В. рассказали о проведении оптимизации количества и распределения гидрантов наружного противопожарного водоснабжения и насосных станций с использованием различных метрик, измеряющих расстояние [8]. Келишек С., Држимала Т рассмотрели главные проблемы, связанные с водным обеспечением систем пожарного водоснабжения в высоких жилых зданиях [9].

В других публикациях приведены результаты исследований надежности противопожарного водоснабжения для привлечения внимания специалистов по данному вопросу [10–13].

Свод правил СП 8.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Наружное противопожарное водоснабжение. Требования пожарной безопасности»[1] (далее — СП 8.13130.2020) определяет требования к расходу воды на наружное пожаротушение.

Для зданий классов функциональной пожарной опасности (далее — ФПО) Ф1, Ф2, Ф3, Ф4 подача воды при тушении пожара зависит от этажности и строительного объема зданий и варьируется от 10 до 35 л/с на один пожар. Для зданий и сооружений класса ФПО Ф5 подача воды зависит от степени огнестойкости, от класса конструктивной пожарной опасности и от категории зданий и сооружений по взрывопожарной и пожарной опасности, а также от строительного объема здания и лежит в пределах от 10 до 100 л/с на один пожар.

Но то же время отсутствует детализация требований к расходу воды на наружное пожаротушение для зданий и сооружений в зависимости от классов ФПО. И в задачу авторов данного исследования входит определение фактического объема подачи воды при тушении пожара с учетом классов функциональной пожарной опасности объектов пожара.

Материалы и методы. Для определения расхода воды при тушении пожаров на различных объектах проведен анализ пожаров, произошедших в Российской Федерации в 2019–2021 годах в следующих субъектах: Московская, Воронежская, Тульская, Ленинградская, Мурманская, Нижегородская, Самарская, Свердловская, Тюменская области, Краснодарский, Красноярский, Приморский, Ставропольский края, Республики Дагестан, Бурятия, Ямало-Ненецкий автономный округ.

Статистические данные о пожарах и фактическом расходовании воды на их тушение за 2019–2021 годы получены из банка данных по пожарам[2].

Результаты исследования. В таблице 1 представлено распределение пожаров по расходу воды для объектов различных классов ФПО, определенных в соответствии со статьей 32 Технического регламента о требованиях пожарной безопасности[3]. Распределение пожаров по расходу воды для всех объектов приведено на рис. 1. На пожары с расходом воды не более 7 л/с приходится 79 % от общего количества пожаров, пожары с расходом более 60 л/с составляют 0,62 %, с расходом более 100 л/с — 0,18 %.

Таблица 1

Распределение пожаров по расходу воды в зависимости от класса функциональной пожарной опасности объекта пожара, % от общего числа пожаров

Класс ФПО	Расход воды, л/с												Средний расход
	0–3,5	4–7	7,5–12	12,5–20	21–30	31–40	41–60	61–80	81–100	101–120	121–140	> 140	
Ф1	**47,2**	**33,3**	**10,0**	**6,6**	**2,1**	**0,4**	**0,3**	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**6,8**
Ф1.1	63,9	22,9	4,9	2,8	2,8	0,7	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,6
Ф1.2	42,3	27,4	11,3	6,9	5,6	1,6	2,8	0,4	1,2	0,4	0,0	0,0	10,7
Ф1.3	69,8	19,0	4,8	3,9	1,6	0,4	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	5,7
Ф1.4	36,2	40,3	12,5	7,9	2,3	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3
Ф2	**43,1**	**28,5**	**12,4**	**7,3**	**7,3**	**0,7**	**0,7**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**8,2**
Ф2.1	42,0	27,5	14,5	7,2	7,2	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,4
Ф2.2	30,0	35,0	15,0	5,0	10,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,9
Ф2.3	47,8	21,7	8,7	17,4	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8
Ф2.4	52,0	32,0	8,0	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7
Ф3	**51,6**	**30,4**	**7,5**	**6,3**	**2,8**	**0,6**	**0,5**	**0,2**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**7,0**
Ф3.1	55,0	25,5	7,5	6,7	2,8	0,9	0,9	0,4	0,1	0,1	0,0	0,0	7,4
Ф3.2	50,9	24,2	8,6	9,8	4,0	1,4	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	7,9

[1] *Системы противопожарной защиты. Наружное противопожарное водоснабжение. Требования пожарной безопасности.* Свод правил СП 8.13130.2020. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/565391175 (дата обращения: 14.08.2023).

[2] *О внесении изменений в Порядок учета пожаров и их последствий, утвержденный приказом МЧС России от 21 ноября 2008 г. № 714.* Приказ МЧС России от 17.11.2020 г. № 848. Информационно-правовой портал Гарант.ру. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400020288/ (дата обращения: 14.08.2023).

[3] *Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.* Федеральный закон № 123-ФЗ от 22.07.2008. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/902111644 (дата обращения: 14.08.2023).

Класс ФПО	Расход воды, л/с												Средний расход
	0–3,5	4–7	7,5–12	12,5–20	21–30	31–40	41–60	61–80	81–100	101–120	121–140	> 140	
Ф3.3	62,5	0,0	0,0	37,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,2
Ф3.4	57,1	36,7	4,1	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5
Ф3.5	60,7	23,4	7,0	4,9	2,0	0,8	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	6,6
Ф3.6	46,9	37,7	7,3	5,3	2,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,4
Ф3.7	43,8	27,1	12,5	10,4	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8
Ф4	**53,7**	**23,9**	**8,2**	**8,5**	**3,4**	**0,3**	**0,8**	**0,2**	**0,5**	**0,5**	**0,2**	**0,3**	**8,3**
Ф4.1	55,8	25,7	6,2	8,8	1,8	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	8,0
Ф4.2	69,2	19,2	7,7	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,1
Ф4.3	52,4	23,7	8,7	8,7	4,0	0,4	0,8	0,2	0,6	0,0	0,2	0,2	8,5
Ф5	**49,7**	**29,4**	**8,7**	**7,1**	**2,9**	**0,8**	**0,7**	**0,3**	**0,1**	**0,2**	**0,0**	**0,0**	**7,6**
Ф5.1	40,9	27,9	11,5	10,1	5,5	1,4	1,5	0,7	0,2	0,2	0,1	0,0	9,7
Ф5.2	53,8	28,4	7,4	6,4	2,3	0,8	0,5	0,3	0,1	0,1	0,0	0,1	7,0
Ф5.3	46,5	35,8	9,7	5,4	1,6	0,3	0,5	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	6,7
Всего	**47,9**	**32,5**	**9,6**	**6,7**	**2,3**	**0,5**	**0,4**	**0,2**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**7,0**

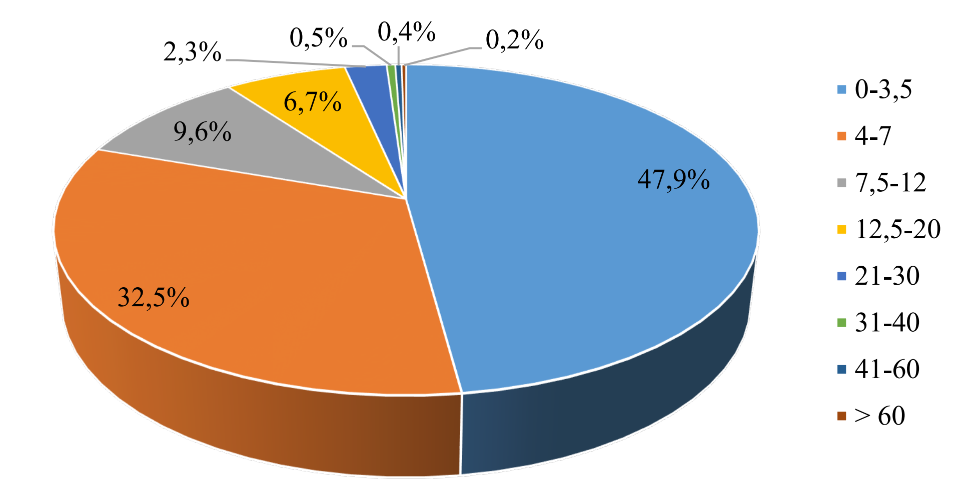


Рис. 1. Распределение пожаров в зависимости от расхода воды

Средний расход воды при тушении пожаров в зависимости от класса ФПО объекта пожара показан на рис. 2. Наибольший средний расход воды зарегистрирован для объектов класса ФПО Ф1.2 «гостиницы, общежития (за исключением общежитий квартирного типа), спальные корпуса санаториев и домов отдыха общего типа, кемпингов» — 10,7 л/с. На втором месте по значению анализируемого показателя находятся объекты класса ФПО Ф2.2 «музеи, выставки, танцевальные залы и другие подобные учреждения в закрытых помещениях» — 9,9 л/с. На третьем месте — объекты класса ФПО Ф5.1 «производственные здания, сооружения, производственные и лабораторные помещения, мастерские, крематории» — 9,7 л/с.

Наименьший средний расход воды зарегистрирован для объектов класса ФПО Ф4.2 «здания образовательных организаций высшего образования, организаций дополнительного профессионального образования» — 5,1 л/с, объектов класса ФПО Ф3.4 «здания медицинских организаций, предназначенные для осуществления медицинской деятельности, за исключением зданий, относящихся к категории Ф1.1» — 5,5 л/с и объектов класса ФПО Ф1.3 «многоквартирные жилые дома, в том числе общежития квартирного типа» — 5,7 л/с.

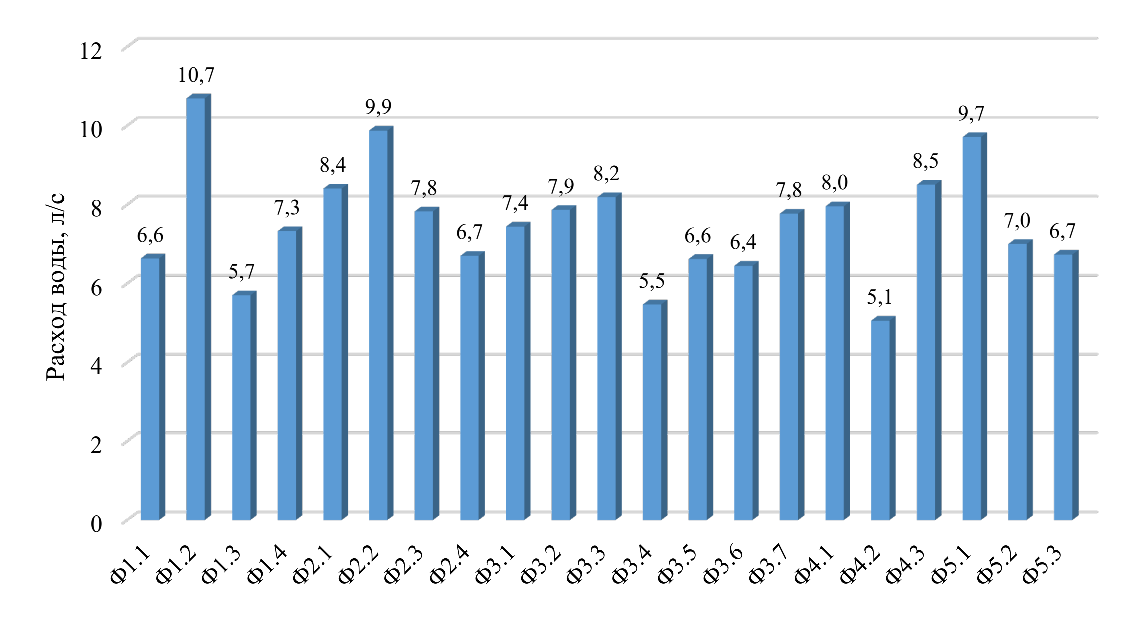


Рис. 2. Средний расход воды в зависимости от класса функциональной пожарной опасности объекта пожара

Для объектов класса ФПО Ф1 на пожары с расходом воды не более 7 л/с приходится 80,5 % от общего количества пожаров, пожары с расходом более 60 л/с составляют 0,15 %, с расходом более 100 л/с — 0,08 %.

Для объектов класса ФПО Ф1.3 «многоквартирные жилые дома, в том числе общежития квартирного типа» распределение пожаров по расходу воды в зависимости от этажа, на котором произошел пожар, представлено в таблице 2. Рассматривались пожары в квартирах и в помещениях общей долевой собственности (подвалы, чердаки, мансарды). Распределение пожаров по расходу воды для данных объектов приведено на рис. 3. На пожары с расходом воды не более 7 л/с приходится 88,4 % от общего количества пожаров, пожары с расходом более 60 л/с составляют 0,25 %, с расходом более 100 л/с — 0,06 %.

Таблица 2

Распределение пожаров по расходу воды в зависимости от этажа, на котором произошел пожар, для объектов класса ФПО Ф1.3 «многоквартирные жилые дома, в том числе общежития квартирного типа», % от общего числа пожаров

Этаж	Расход воды, л/с												Средний расход
	0–3,5	4–7	7,5–12	12,5–20	21–30	31–40	41–60	61–80	81–100	101–120	121–140	> 140	
подвал	85,4	12,8	0,3	0,7	0,3	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3
цоколь	70,3	25,0	0,0	1,6	1,6	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3
1	64,5	19,7	6,8	5,6	2,1	0,5	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2
2	67,4	21,2	4,2	3,5	2,1	0,4	0,6	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	6,1
3	76,6	19,4	1,5	1,9	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	4,6
4	78,9	18,0	1,8	0,8	0,2	0,4	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5
5	81,5	14,9	1,7	1,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4
6	77,0	19,7	0,8	2,2	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5
7	77,9	20,0	1,2	0,3	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4
8	83,7	13,4	1,5	0,0	0,6	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	4,8
9	77,4	18,9	2,3	1,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4
10	82,7	13,3	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	6,2
11	90,1	5,6	1,4	0,0	1,4	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5
12	80,8	19,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1
13	85,7	9,5	2,4	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2
14	75,0	22,2	0,0	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5

Этаж	Расход воды, л/с												Средний расход
	0–3,5	4–7	7,5–12	12,5–20	21–30	31–40	41–60	61–80	81–100	101–120	121–140	> 140	
15	85,7	11,4	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0
16	83,8	10,8	2,7	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3
17	89,5	10,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8
18–25	84,4	8,9	4,4	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3
мансарда	56,4	3,6	12,7	14,5	10,9	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,2
чердак	44,3	20,3	14,9	9,8	5,7	2,2	1,6	0,6	0,3	0,3	0,0	0,0	10,0
Всего	69,3	19,2	4,9	4,0	1,6	0,4	0,3	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	5,7

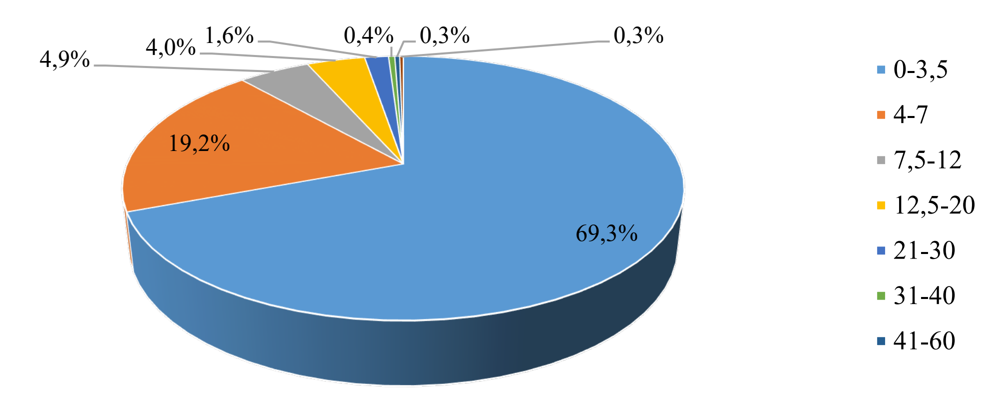


Рис. 3. Распределение пожаров на объектах класса ФПО Ф1.3 в зависимости от расхода воды

Средний расход воды при тушении пожаров в зависимости от этажа, на котором возник пожар, для объектов класса ФПО Ф1.3 показан на рис. 4. Наибольший средний расход воды зарегистрирован для пожаров, возникших на чердаке и мансарде — соответственно 10 и 9,2 л/с, а также на 1 и 2 этажах — 6,2 и 6,1 л/с. Для пожаров, возникших на других этажах, средний расход лежит в пределах 4–5 л/с. Исключение составляет 10 этаж, для пожаров на этом этаже средний расход воды составляет 6,2 л/с. Такой большой расход получен из-за одного пожара, произошедшего 30 сентября 2021 года в г. Тюмени по адресу: Восточный административный округ, ул. Народная, д. 10, для тушения которого было привлечено 15 единиц пожарной техники и использовалось 26 пожарных стволов. Общий расход воды составил 421 л/с. Без учета этого пожара средний расход воды для пожаров на 10 этаже составляет 4,1 л/с.

Для объектов класса ФПО Ф2 на пожары с расходом воды не более 7 л/с приходится 71,5 % от общего количества пожаров, пожары с расходом более 30 л/с составляют 1,46 %, пожаров с расходом более 60 л/с за рассматриваемый период не зарегистрировано. Средний расход воды на объектах класса ФПО Ф2 составляет 8,2 л/с.



Рис. 4. Средний расход воды в зависимости от этажа пожара для объектов класса ФПО Ф1.3

Для объектов класса ФПО Ф3 на пожары с расходом воды не более 7 л/с приходится 81,9 % от общего количества пожаров, пожары с расходом более 60 л/с составляют 0,38 %, с расходом более 100 л/с — 0,08 %. Средний расход воды на объектах класса ФПО Ф3 составляет 7,0 л/с.

Для объектов класса ФПО Ф4 на пожары с расходом воды не более 7 л/с приходится 77,6 % от общего количества пожаров, пожары с расходом более 60 л/с составляют 1,13 %, с расходом более 100 л/с — 0,48 %. Средний расход воды на объектах класса ФПО Ф4 составляет 8,3 л/с.

Распределение пожаров по расходу воды для объектов класса ФПО Ф5 приведено на рис. 5. На пожары с расходом воды не более 7 л/с приходится 79,0 % от общего количества пожаров, пожары с расходом более 60 л/с составляют 0,35 %, с расходом более 100 л/с — 0,18 %. Средний расход воды на объектах класса ФПО Ф5 составляет 7,6 л/с.

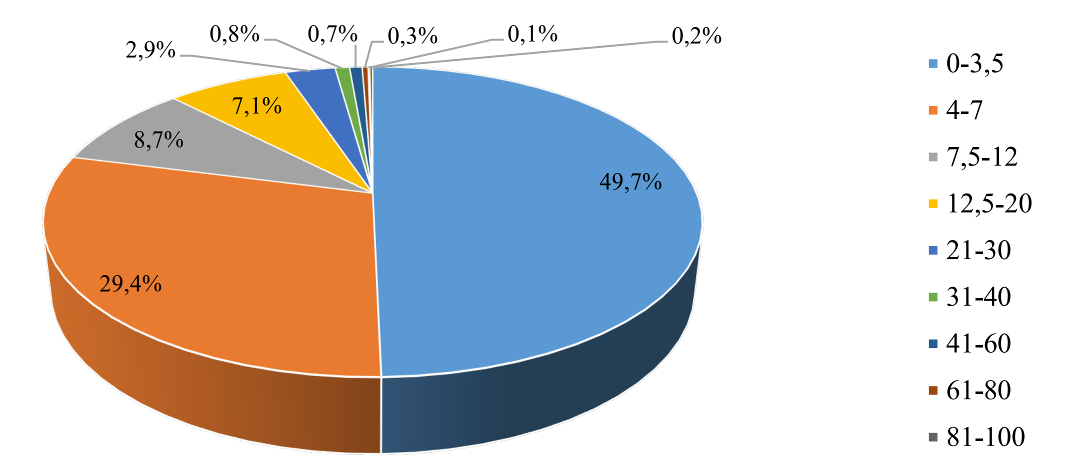


Рис. 5. Распределение пожаров на объектах класса ФПО Ф5 в зависимости от расхода воды

Обсуждение и заключение. Сравнение полученных результатов с нормативами СП 8.13130.2020 показало следующее.

Фактический расход воды на один пожар для зданий класса Ф 1.4 «одноквартирные жилые дома, в том числе блокированные» оказался выше, чем для зданий класса Ф 1.3 «многоквартирные жилые дома, в том числе общежития квартирного типа», то есть 7,3 л/с против 5,7 л/с. Максимальный расход воды на один пожар в населенных пунктах с малоэтажной застройкой, согласно СП 8.13130.2020, составляет 40 л/с, при этом на 29 пожарах из 1000 на объектах класса Ф1.4 фактический расход воды превышает 40 л/с (таблица 1).

Согласно таблице 2, расход воды на наружное пожаротушение зданий на один пожар для зданий класса Ф 1.3 и Ф 1.4 зависит от этажности зданий и их строительного объема. Как показали проведенные исследования, фактический расход воды практически не зависит от этажа, на котором произошел пожар, но существенно возрастает для пожаров на чердаках и мансардных этажах. При этом для зданий высотой не более двух этажей в СП 8.13130.2020 определен расход воды 10 л/с на один пожар. Фактический же расход на 109 пожарах из 1000 для зданий класса Ф 1.4 превышает 12 л/с.

Научная новизна настоящего исследования состоит в том, что выполнен анализ фактического расхода воды на наружное пожаротушение в зависимости от класса функциональной пожарной опасности объекта пожара и показано, что фактическая подача воды при тушении пожара существенно различается для различных объектов — от 5,1 л/с в расчете на один пожар для объектов класса Ф 4.2 до 10,7 л/с для объектов класса Ф 1.2.

Таким образом, система водоснабжения, используемая для противопожарных целей, должна иметь мощность, обеспечивающую общее количество воды, необходимое для тушения пожара, то есть при планировании водопроводов противопожарного водоснабжения необходимо учитывать не только требования СП 8.13130.2020, но и особенности объектов защиты.

Полученные в настоящей работе результаты могут быть использованы для актуализации требований свода правил СП 8.13130.2020, что позволит повысить эффективность действий подразделений пожарной охраны при тушении пожаров.

Список литературы

1. Бараковских С.А., Карама Е.А. Совершенствование способов тушения пожаров в условиях неудовлетворительного противопожарного водоснабжения. *Техносферная безопасность*. 2018;4(21):26–29. URL: https://uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/tb21/4.pdf (дата обращения: 14.08.2023).

2. Пивоваров Н.Ю., Зыков В.В., Гладких А.Н. Петухов А.Н. Подходы к установлению нормативных требований по расходу на наружное противопожарное водоснабжение для жилых многоэтажных зданий из CLT панелей. *Актуальные проблемы безопасности в техносфере*. 2022;3(7):12–20. https://doi.org/10.34987/2712-9233.2022.67.62.002

3. Седнев В.А., Тетерина Н.В., Смуров А.В. Предложения по обеспечению устойчивого противопожарного водоснабжения сельских населенных пунктов в условиях воздействия природных пожаров. *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.* 2016;1–1(7):176–180. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/predlozheniya-po-obespecheniyu-ustoychivogo-protivopozharnogo-vodosnabzheniya-selskih-naselennyh-punktov-v-usloviyah-vozdeystviya/viewer (дата обращения: 14.08.2023).

4. Реутт М.В., Панов А.В. Наружное противопожарное водоснабжение поселений и городских округов. В: *Труды XXXI Международной научно-практической конференции* «Международный салон «Комплексная безопасность-2019». Балашиха; 2019. С. 477–481.

5. Зайко В.А., Ильин Н.А., Саргсян А.М. Системы водоснабжения для тушения пожаров в малых населенных пунктах. *Водоснабжение и санитарная техника.* 2018;(1):40–45.

6. Абросимов Ю.Г., Киселев Л.Ю. Нормирование противопожарного водоснабжения для городов с населением более миллиона человек. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация.* 2008;1:75–82.

7. Чудаков А.А., Метелкин И.И., Шумилин В.В. Оценка современного состояния противопожарного водоснабжения в городских и сельских поселениях на территории Воронежской области. *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы.* 2014;1(1(5)):21–27. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sovremennogo-sostoyaniya-protivopozharnogo-vodosnabzheniya-v-gorodskih-i-selskih-poseleniyah-na-territorii-voronezhskoy/viewer (дата обращения: 14.08.2023).

8. Kalach A.V., Rodin V.A., Sinegubov S.V. Optimizing fire-fighting water supply systems using spatial metrics. *Journal of Computational and Engineering Mathematics.* 2020;7(4):3–16. https://doi.org/10.14529/jcem200401

9. Kieliszek S., Drzymała T. Selected problems of water supply systems for firefighting purposes in high residential buildings. *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza.* 2016;43(3):195–198. https://www.doi.org/10.12845/bitp.43.3.2016.17

10. Basso M. Vieira D.C.S., Mateus M., Ramos T.B. Potential post-fire impacts on a water supply reservoir: an integrated watershed-reservoir approach. *Frontiers in Environmental Science.* 2021;9:684703. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.684703

11. Qi Yang. A study on the reliability of fire water supply system in high-rise buildings. *Fire Technology.* 2002;38(1):71–79.

12. Bonneau A., O'rourke T.D., Palmer M.C. Water supply performance and fire suppression during the world trade center disaster. *Journal of Infrastructure Systems.* 2010;16(4):264–272. http://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000028

13. Kuznetsov G.V., Zhdanova A.O., Strizhak P.A., Atroshenko Y.K. Influence of the method of water supply to the zone of a forest fire on the efficiency of its extinguishing. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* 2020;93(6):1460–1469. http://dx.doi.org/10.1007/s10891-020-02251-z

References

1. Barakovskikh SA, Karama EA. improvement of methods of fighting fires in the conditions of the poor fire water. *Technosphere safety.* 2018;4(21):26–29. URL: https://uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/tb21/4.pdf (accessed: 14.08.2023). (In Russ.).

2. Pivovarov NYu, Zykov VV, Gladkkikh AN, Petukhov AN. Approaches to the establishment of regulatory requirements for the consumption of outdoor fire-fighting water supply for residential multi-storey buildings made of CLT panels. *Actual Security Problems in the Technosphere*. 2022;3(7):12–20. https://doi.org/10.34987/2712-9233.2022.67.62.002 (In Russ.).

3. Sednev VA, Teterina NV, Smurov AV. Predlozheniya po obespecheniyu ustoichivogo protivopozharnogo vodosnabzheniya sel'skikh naselennykh punktov v usloviyakh vozdeistviya prirodnykh pozharov. *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoi oborony i likvidatsii posledstvii chrezvychainykh situatsii.* 2016;1–1(7):176–180. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/predlozheniya-po-obespecheniyu-ustoychivogo-protivopozharnogo-vodosnabzheniya-selskih-naselennyh-punktov-v-usloviyah-vozdeystviya/viewer (accessed: 14.08.2023). (In Russ.).

4. Reutt MV, Panov AV. Naruzhnoe protivopozharnoe vodosnabzhenie poselenii i gorodskikh okrugov. In: *Trudy XXKhI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Mezhdunarodnyi salon «Kompleksnaya bezopasnost'-2019"*. Balashikha; 2019. P. 477–481. (In Russ.).

5. Zaiko VA, Il'in NA, Sargsyan AM. Water supply systems for firefighting in small communities. *Water Supply and Sanitary Technique.* 2018;(1):40–45. (In Russ.).

6. Abrosimov YuG, Kiselev LYu. Normirovanie protivopozharnogo vodosnabzheniya dlya gorodov s naseleniem bolee milliona chelovek. *Pozhary i chrezvychainye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya.* 2008;1:75–82. (In Russ.).

7. Chudakov AA, Metelkin II, Shumilin VV. Otsenka sovremennogo sostoyaniya protivopozharnogo vodosnabzheniya v gorodskikh i sel'skikh poseleniyakh na territorii Voronezhskoi oblasti. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy.* 2014;1(1(5)):21–27. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sovremennogo-sostoyaniya-protivopozharnogo-vodosnabzheniya-v-gorodskih-i-selskih-poseleniyah-na-territorii-voronezhskoy/viewer (accessed: 14.08.2023). (In Russ.).

8. Kalach AV, Rodin VA, Sinegubov SV. Optimizing fire-fighting water supply systems using spatial metrics. *Journal of Computational and Engineering Mathematics.* 2020;7(4):3–16. https://doi.org/10.14529/jcem200401

9. Kieliszek S, Drzymała T. Selected problems of water supply systems for firefighting purposes in high residential buildings. *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza.* 2016;43(3):195–198. https://doi.org/10.12845/bitp.43.3.2016.17

10. Basso M, Mateus M, Ramos TB, Vieira DCS. Potential post-fire impacts on a water supply reservoir: an integrated watershed-reservoir approach. *Frontiers in Environmental Science.* 2021;9:684703. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.684703

11. Qi Yang. A study on the reliability of fire water supply system in high-rise buildings. *Fire Technology.* 2002;38(1):71–79.

12. Bonneau A, O'rourke TD, Palmer MC. Water supply performance and fire suppression during the world trade center disaster. *Journal of Infrastructure Systems.* 2010;16(4):264–272. http://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000028

13. Kuznetsov GV, Zhdanova AO, Strizhak PA, Atroshenko YuK. Influence of the method of water supply to the zone of a forest fire on the efficiency of its extinguishing. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* 2020;93(6):1460–1469. http://dx.doi.org/10.1007/s10891-020-02251-z

Поступила в редакцию 13.09.2023
Поступила после рецензирования 27.09.2023
Принята к публикации 14.10.2023

Об авторах:

Андрей Александрович Кондашов, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского ордена «Знак почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (143903, РФ, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12), SPIN-код: 2248-9764, ScopusID:, AuthorID, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Евгений Васильевич Бобринев, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Всероссийского ордена «Знак почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (143903, РФ, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12), SPIN-код: 7690-7389, ScopusID, AuthorID, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Елена Юрьевна Удавцова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского ордена «Знак почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (143903, РФ, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12), SPIN-код: 1125-8841, ScopusID, AuthorID, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Светлана Игоревна Рюмина, научный сотрудник Всероссийского ордена «Знак почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (143903, РФ, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12), SPIN-код: 2523-5991, AuthorID, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А.А. Кондашов — анализ статистических данных, написание первого варианта статьи.

Е.В. Бобринев — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, выводы по результатам расчетов.

Е.Ю. Удавцова — сбор статистических данных, редактирование окончательного варианта статьи.

С.И. Рюмина — формирование списка литературы, подготовка рисунков, редактирование окончательного варианта статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 13.09.2023
Revised 27.09.2023
Accepted 14.10.2023

About the Authors:

Andrey A. Kondashov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of the All-Russian Research Institute of Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (12, VNIIPO, Balashikha, mkr., 143903, RF), SPIN-code: 2248-9764, ScopusID, AuthorID, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Evgeniy V. Bobrinev, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Leading Researcher of the All-Russian Research Institute of Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (12, VNIIPO, Balashikha, mkr., 143903, RF), SPIN-code: 7690-7389, ScopusID, AuthorID, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Elena Yu. Udavtsova, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the All-Russian Research Institute of Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (12, VNIIPO, Balashikha, mkr., 143903, RF), SPIN-code: 1125-8841, ScopusID, AuthorID, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

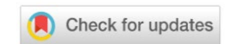
Svetlana I. Ryumina, Researcher of the All-Russian Research Institute of Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (12, VNIIPO, Balashikha, mkr., 143903, RF), SPIN-code: 2523-5991, AuthorID, ORCID, otdel_1_3@mail.ru

Claimed contributorship:
AA Kondashov: analysis of statistical data, writing the first version of the article.
EV Bobrinev: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, conclusions based on the results of calculations.
EYu Udavtsova: collection of statistical data, editing of the final version of the article.
SI Ryumin: references, preparation of drawings, editing of the final version of the article.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY

УДК 622.8:65.012.12 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-40-54

Имитационное моделирование процесса реализации риска аварии при проведении вскрышных работ на угольном разрезе

М.А. Ковалев[1], **В.В. Москвичев**[1,2]
[1] Красноярский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Российская Федерация
[2] Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация
kovalevmalk@gmail.com

Аннотация
Введение. Необходимость повышения уровня комплексной безопасности, снижения показателей аварийности и травматизма, минимизации риска отказов, аварий и катастроф предопределяет актуальность исследований взаимосвязи элементов системы «человек – машина – среда» («Ч–М–С») при проведении открытых горных работ. Одним из наиболее эффективных механизмов исследования функциональных характеристик системы «Ч–М–С» угольного разреза является проведение имитационного моделирования с целью выявления проблемных ситуаций, являющихся триггерами аварий с катастрофическими последствиями и травмированием персонала. Имитационное моделирование технологического процесса предполагает конструирование модели реальной системы и постановку вычислительных экспериментов для описания поведения системы и оценки различных стратегий, обеспечивающих её функционирование. Целью данного исследования является адаптация технологий имитационного моделирования для решения проблемы комплексной безопасности при проведении открытых горных работ. В рамках исследования поставлена задача определения элементов, вносящих наибольший вклад в реализацию рисков в системе «Ч–М–С» при проведении вскрышных работ на угольном разрезе. В качестве моделируемых подсистем выступают «человек», «машина», «среда», «погодные условия».
Материалы и методы. Процесс вскрышных работ рассмотрен в методологии ARIS eEPC (extended Event Driven Process Chain) как бизнес-процесс, связывающий совокупность подпроцессов и/или бизнес-операций. Для построения имитационной модели в программной среде AnyLogic бизнес-процесс вскрышных работ в нотации ARIS eEPC описан графом, представляющим структуру, состоящую из объектов и связей между ними. Данный подход позволяет структурировать последовательность событий и операций и определить альтернативные исходы, возникающие в процессе выполнения вскрышных работ.
Результаты исследования. В рамках исследования разработан метод трансляции формальной модели бизнес-процесса вскрышных работ в нотации ARIS eEPC в комбинированную имитационную модель AnyLogic. На основе разработанного метода проведена серия машинных экспериментов, определены элементы, оказывающие влияние на реализацию риска аварий в системе «Ч–М–С» угольного разреза.
Обсуждение и заключение. Технологии имитационного моделирования впервые в отечественной практике исследований системы «Ч–М–С» получили приложение для анализа показателей комплексной безопасности при проведении открытых горных работ. По результатам имитационного эксперимента установлено, что основное влияние на снижение надежности подсистемы «машина» оказывает человеческий фактор, который в совокупности с психофизиологическими свойствами человека усиливает развитие эффекта домино при реализации рисков различных типов. Представленные результаты и опытная апробация технологии имитационного моделирования могут иметь расширенное использование при анализе безопасности сложных технических систем с учетом влияния человеческого и техногенного факторов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, система «человек – машина – среда», событийный анализ риска на угольном разрезе, агентное моделирование вскрышного забоя, AnyLogic, eEPC, ARIS

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Ковалев М.А., Москвичев В.В. Имитационное моделирование процесса реализации риска аварии при проведении вскрышных работ на угольном разрезе. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(4):40–54. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-40-54

Original article

Simulation Modeling of the Process of Accident Risk Realization during Stripping Operations at an Open-Pit Coal Mine

Maksim A. Kovalev[1] ✉, **Vladimir V. Moskvichev**[1,2]
[1] Krasnoyarsk branch of FRC ICT, Krasnoyarsk, Russian Federation
[2] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation
✉ kovalevmalk@gmail.com

Abstract
Introduction. The need to increase the level of comprehensive safety, reduce accident and injury rates, minimize the risk of failures, accidents and catastrophes determines the relevance of research on the relationship of elements of the "human–machine–environment" (H–M–E) system during open-pit mining. One of the most effective mechanisms for studying the functional characteristics of the H–M–E system of a coal mine is to conduct simulation modeling in order to identify problematic situations that trigger accidents with catastrophic consequences and injury to personnel. Simulation modeling of a technological process involves constructing a model of a real system and setting up computational experiments to describe the behavior of the system and evaluate various strategies that ensure its functioning. The aim of the research was to adapt simulation modeling technologies to solve the problem of complex safety during open-pit mining. Within the framework of the study, the task was to determine the elements that made the greatest contribution to the implementation of risks in the H–M–E system during stripping operations at a coal mine. The simulated subsystems were "human", "machine", "environment", and "weather conditions".
Materials and Methods. Stripping process was considered in the ARIS eEPC (extended Event Driven Process Chain) methodology as a business process linking a set of subprocesses and/or business operations. To build a simulation model in the AnyLogic software environment, the business process of stripping works in ARIS eEPC notation was described by a graph representing a structure consisting of objects and connections between them. This approach allowed us to structure the sequence of events and operations and determine alternative outcomes that arose during stripping operations.
Results. As part of the research, a method was developed for translating the formal model of the stripping business process in ARIS eEPC notation into a combined simulation model of AnyLogic. Based on the developed method, a series of machine experiments was carried out. The elements influencing the realization of the risk of accidents in the H–M–E system of a coal mine were determined.
Discussion and Conclusion. For the first time in the domestic practice of research of the H–M–E system, simulation modeling technologies have received an application for the analysis of complex safety indicators during open-pit mining. According to the simulation experiment results, it was found that the main influence on the decrease in the reliability of the "machine" subsystem was exerted by the human factor, which, together with the psychophysiological properties of a person, enhanced the development of the domino effect when implementing various types of risks. The presented results and experimental approbation of simulation modeling technology can have advanced use in the analysis of complex technical systems safety, taking into account the influence of human and man-made factors.

Keywords: simulation modeling, “human-machine-environment” system, analysis of risk at an open-pit coal mine, agent-based modeling of overburden face, AnyLogic, eEPC, ARIS

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Kovalev MA, Moskvichev VV. Simulation Modeling of the Process of Accident Risk Realization During Stripping Operations at an Open-Pit Coal Mine. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):40–54. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-40-54

Введение. При проведении вскрышных работ на угольных разрезах вопросы повышения безопасности, снижения аварийности, исключения случаев травматизма постоянно находились и находятся в центре особого внимания. Именно они придают актуальность всем исследованиям в данной области. Современный взгляд на

проблему формирования предпосылок аварий на угольном разрезе предлагает рассматривать их в формате системы «Ч–М–С», развитой в работах [1, 2]. Система включает в себя оператора-машиниста экскаватора, бульдозера, буровой установки, водителя автосамосвала («человек»), карьерный экскаватор, бульдозер, буровую установку, автосамосвал («машина»), вскрышной забой, угольный забой, буровой блок («рабочая среда»). Данные подсистемы взаимодействуют между собой по заданной технологии и установленной организации работ в рамках технологического процесса. Помимо основных компонентов системы, ее модель включает в себя связи между ними и окружающей внешней средой, к которой отнесены погодные условия, горно-геологический фактор (крепость породы, уровень грунтовых вод, устойчивость борта разреза).

Функционирование системы «Ч–М–С» сопровождается реализацией различных видов и групп риска, которые необходимо своевременно идентифицировать и принимать необходимые меры, направленные на защиту системы и смягчение последствий в случае возникновения опасности. Эффективным механизмом исследования функциональных характеристик моделируемой системы «Ч–М–С» угольного разреза и выявления проблемных ситуаций, выступающих триггерами аварий с катастрофическими последствиями и травмированием персонала, является проведение имитационного моделирования.

Имитационное моделирование технологического процесса предполагает конструирование модели исследуемой системы и постановку вычислительных экспериментов с целью описания её поведения и оценки (в рамках ограничений, накладываемых некоторым критерием или их совокупностью) различных стратегий, обеспечивающих функционирование данной системы [3]. Имитационное моделирование является ключевым инструментом исследования поведения реальных систем, но не решает оптимизационных задач, а, скорее, представляет собой технологию оценки значений функциональных характеристик моделируемой системы, позволяя выявлять её проблемные места [4]. Имитационные модели широко применяются для прогнозирования поведения логистических систем, при проектировании и размещении предприятий, оптимизации существующих процессов, для обучения и тренировки персонала и т. д.

В настоящее время в области имитационного моделирования выделяют три основных направления: системная динамика, дискретно-событийное и агентское моделирование. Отличаются данные направления уровнем абстракции моделируемых в их среде моделей. Отмечают три уровня абстракции имитационного моделирования: стратегический (высокоуровневые стратегии, моделирующие поведение людей, организаций), тактический (построение моделей систем массового обслуживания и моделей бизнес-процессов), оперативный (построение моделей мехатронных систем, уличного и пешеходного движение и т. д.) [5, 6].

Процесс проведения вскрышных работ на угольном разрезе можно рассматривать в методологии ARIS eEPC (extended Event Driven Process Chain — расширенная нотация описания цепочки процесса) как описание потока последовательно выполняемых работ, расположенных в порядке их выполнения [7]. Данная ситуация представляется как бизнес-процесс, связывающий совокупность подпроцессов, и/или бизнес-операций, и/или бизнес-функций, в ходе выполнения которых потребляются определенные ресурсы и создается продукт (вещественный или нематериальный результат человеческого труда: предмет, услуга, научное открытие, идея), представляющий ценность для потребителя [8].

Имитационное моделирование осуществляется в среде программного обеспечения AnyLogic, представляющего собой гибкую мультиагентную моделирующую платформу, которая используется для создания разнообразных имитационных моделей в области бизнеса, инженерии, логистики и в других сферах. Разные средства спецификации и анализа результатов, имеющиеся в AnyLogic, позволяют строить модели (динамические, дискретно-событийные, агентные), имитирующие практически любой реальный процесс, выполнять компьютерный анализ моделей без проведения реальных экспериментов и сложных вычислительных процедур [9].

Исходя из целей исследования и с учетом опыта применения технологии имитационного моделирования сформулированы следующие задачи, которые должны быть решены в данной работе:

1. Описать процесс проведения вскрышных работ в нотации eEPC.

2. Транслировать модель вскрышного забоя из нотации eEPC в комбинированную модель программной среды AnyLogic, провести серию имитационных экспериментов.

3. Сравнить результаты имитационных экспериментов моделирования процесса возникновения риска и его перерастания в причинно-следственную последовательность катастрофической аварии и травмирования персонала при проведении вскрышных работ в системе «Ч–М–С» угольного разреза.

Материалы и методы. Бизнес-процесс проведения вскрышных работ на угольном разрезе в нотации eEPC [10, 11] можно описать графом как $G = \{X, V\}$, где X и V являются основными компонентами модели (рис. 1).

На рис. 1. G (граф) представляет собой структуру, состоящую из объектов и связей между ними. В данном контексте граф описывает процесс вскрышных работ и его логическую структуру. Она помогает визуализировать последовательность событий и операций, а также определять, какие альтернативные исходы могут возникнуть в процессе выполнения работ. На рис. 2 представлены основные типы объектов графа, используемые при построении имитационной модели.

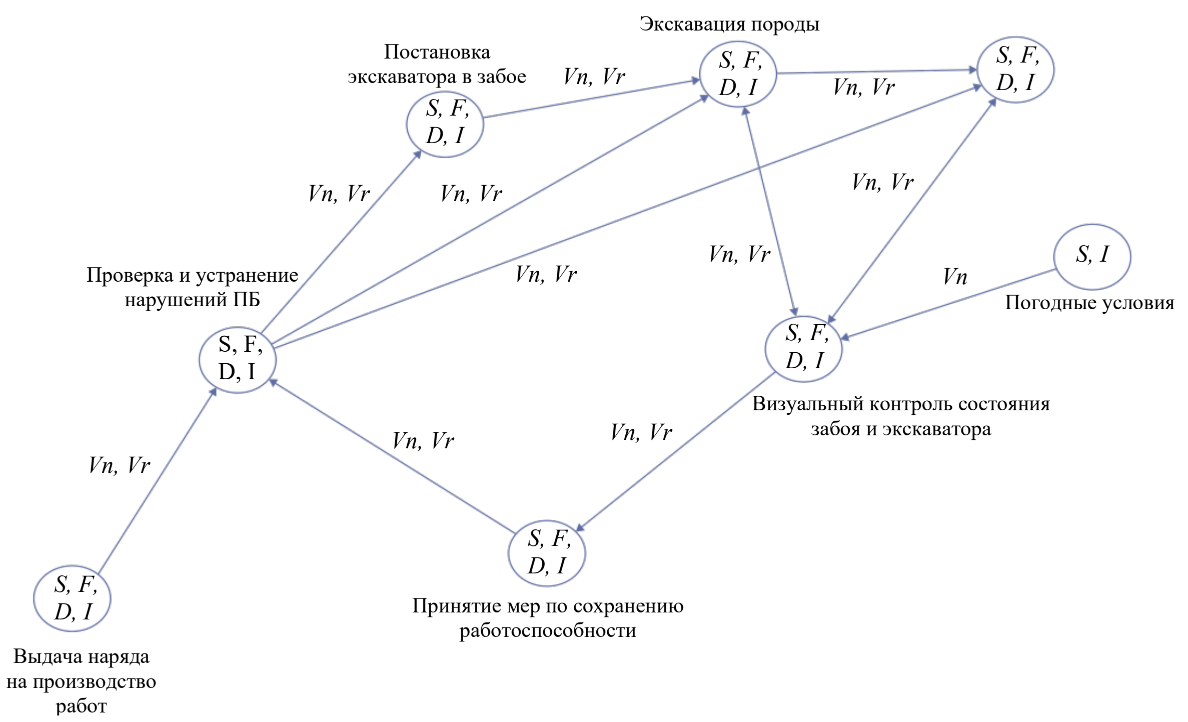


Рис 1. Граф процесса вскрышных работ

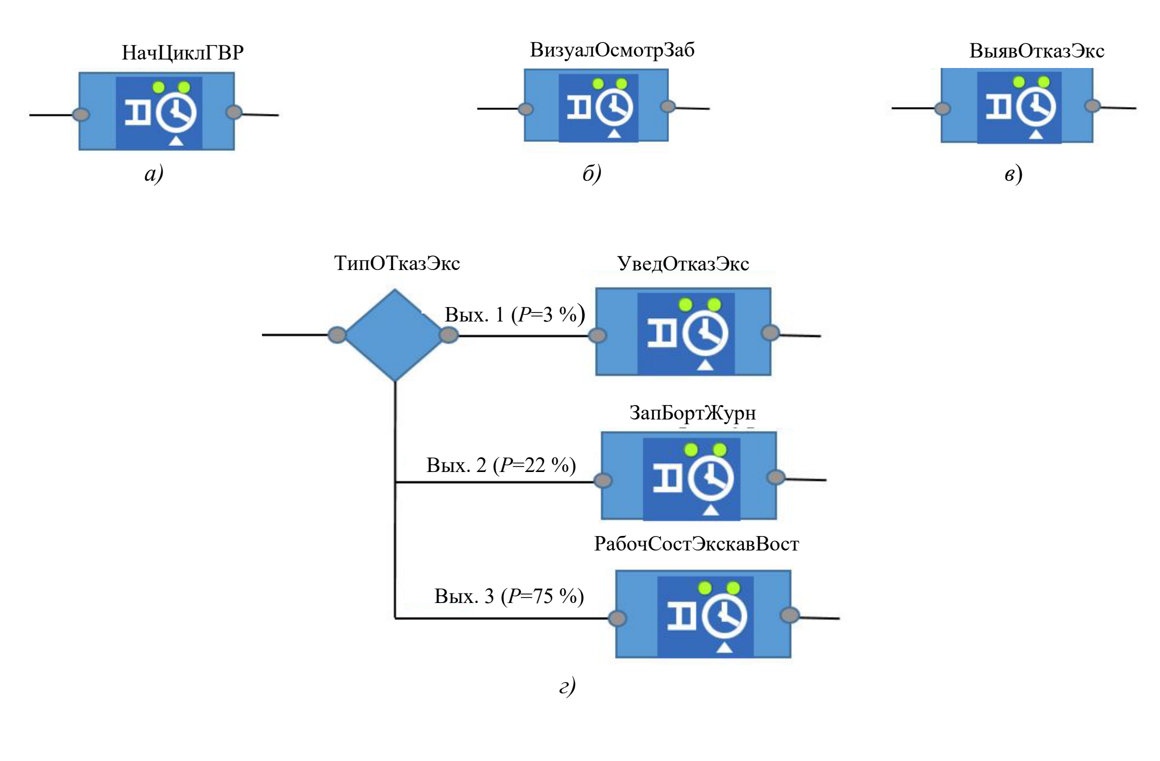
1. *X* — множество объектов модели (вершин графа), где *X* = {*S*, *F*, *D*, *I*} и состоит из четырех типов объектов:

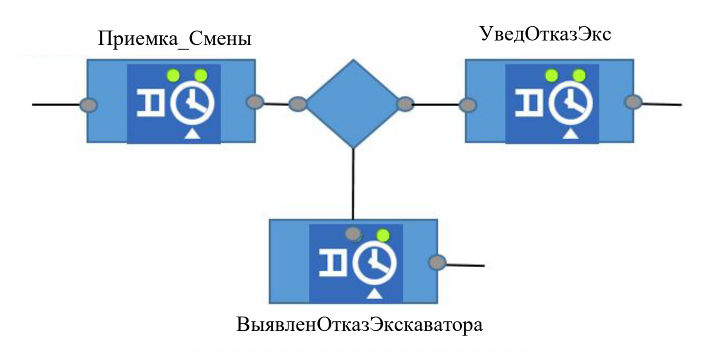
– *S* (события): эти объекты представляют собой различные события или этапы, которые происходят в процессе вскрышных работ, например «Постановка экскаватора в забое», «Экскавация породы», «Погрузка породы в транспортный сосуд». Пример реализации данного объекта в имитационной модели представлен сервисным блоком «Начало цикла горно-выемочных работ» на рис. 2 *а*.

– *F* (функция): функциональные объекты, которые могут применяться во время технологических операций. Это операции, необходимые для успешного завершения процесса, например визуальный контроль текущего состояния экскаватора или забоя, контроль положения автосамосвала и другого технологического оборудования или людей в забое. Пример реализации данного объекта в имитационной модели представлен сервисным блоком «Визуальный осмотр забоя» на рис. 2 *б*.

– *D* (операция): операции, требуемые для выполнения вскрышных работ, например проведение технического осмотра или ремонта экскаватора, устранение нарушений правил безопасности и так далее. Пример реализации данного объекта в имитационной модели представлен сервисным блоком «Выявление отказа экскаватора» на рис. 2 *в*.

– *I* (правило XOR/OR): эти объекты определяют логику ветвления и слияния в процессе. Правило OR указывает, что после выполнения нескольких альтернативных событий процесс может продолжаться, если хотя бы одно из них завершено. Например, машинист проверяет рабочее состояние экскаватора в начале смены. У данного события может быть два исхода: «техническое состояние исправно»; «обнаружены неисправности». Оба исхода ведут к реализации различных ветвей событий развития модели. Оператор XOR означает, что выбирается только один из нескольких альтернативных путей развития модели. Например, при выявлении отказа оборудования экскаватора машинистом оператор XOR задает вероятности реализации альтернативных исходов: «рабочее состояние экскаватора восстановлено», «выявлены неисправности, не влияющие на работу экскаватора», «эксплуатация экскаватора небезопасна». Пример реализации данного объекта в имитационной модели представлен блоком SelectOutput «Тип отказа экскаватора, правило XOR» на рис. 2 *г*.





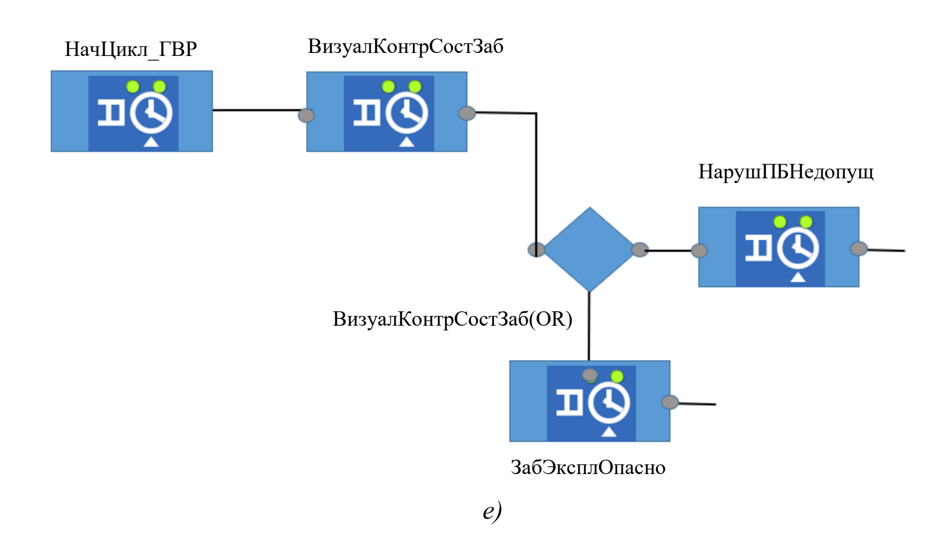


Рис. 2. Схема реализации объектов графа в имитационной модели:
а — «событие» (начало цикла горно-выемочных работ); *б* — «функция» (визуальный осмотр забоя);
в — «операция» (выявление отказов экскаватора); *г* — «правило XOR» (реализация типа отказа экскаватора);
д — «дуга» (переход от приемки смены к проверке рабочего состояния экскаватора); *е* — «ребро» (альтернативные пути ветвления дальнейшего процесса при визуальном контроле состояния забоя)

2. *V* — множество дуг и ребер, которые связывают объекты из множества, то есть вершины графа. *V* разделяется на два подмножества:

– *Vn* (дуги): эти связи между объектами указывают на последовательность событий или операций. Например, «Приемка смены» связана с «Проверкой рабочего состояния экскаватора», так как это следующий шаг в процессе. Пример реализации «дуги» в имитационной модели представлен на рис. 2 *д*.

– *Vr* (ребра): ребра соединяют вершины с правилами XOR/OR, что определяет, какие альтернативные пути ветвления могут возникнуть в процессе. Например, после начала «Экскавации породы» может быть ребро, которое соединяет с оператором OR. Это означает, что после извлечения породы из целика может возникнуть несколько различных событий («допущено нарушение безопасности», «нет нарушения безопасности»), и процесс продолжится, если хотя бы одно из них завершено. Пример реализации ребра в имитационной модели представлен на рис. 2 *е*.

Агентная составляющая модели в AnyLogic реализуется с помощью базового объекта — активного объекта. Активный объект имеет параметры, переменные, которые можно считать памятью агента, стейтчарты выражают поведение: состояния объекта и изменение состояний под воздействием событий и условий. Агентом в имитационной модели процесса вскрышных работ выступает блок «Среда». Логика модели предусматривает, что «Среда» оказывает влияние на величину ошибки машиниста при обработке входящей информации. В модели влияние «Среды» на восприятие информации машинистом реализовано моделированием состояния погодных условий. Сильный дождь приводит к ухудшению видимости из кабины машиниста, что может быть причиной некорректного восприятия информации о состоянии забоя или текущего состояния узлов экскаватора. Сильный ветер поднимает облако угольной пыли, которая также нарушает визуальный контакт между машинистом и забоем. Поэтому, когда «Среда» не образует сигнал об изменении погодных условий, вероятность ошибки машиниста за 1 час работы 94 %, при входе сигнала от «Среды» вероятность ошибки возрастает до 96 % за час работы. Генерация изменения погодных условий осуществляется случайным образом.

Дискретно-событийная составляющая модели в AnyLogic (Discrete Event Model) реализуется с помощью функций распределения вероятностей и может быть описана как $\mathrm{ALM} = \{\mathrm{Oper}, \mathrm{Var}\}$. Такая модель используется, когда события происходят в дискретные моменты времени и могут влиять на ход процесса, и позволяет моделировать и анализировать процесс вскрышных работ с учетом случайных факторов и вариабельности.

1. Oper — множество объектов перехода события между выполняемыми операциями, включает в себя следующие элементы:

– Source (Источник): это место, где события начинаются или создаются, например начало производства работ машинистом экскаватора после получения наряд-задания;

– SelectOutput (Выбор выхода): механизм, который определяет, куда будет направлено событие после того как оно возникло. Например, после того как машинист завершил визуальный контроль состояния забоя, SelectOutput поможет определить, какое действие будет следующим: продолжить работу или перейти к устранению возникших нарушений промышленной безопасности в забое.

2. Var — множество переменных, которые используются в модели для хранения данных или состояния процесса. Например, это переменные, которые отслеживают время выполнения каждой операции или события.

Взаимодействие элементов предложенной модели в процессе возникновения и реализации риска ниже рассматривается на примере выполнения технологической операции по экскавации породы из вскрышного забоя машинистом гидравлического карьерного экскаватора. Задача проведения эксперимента по имитационному моделированию процесса проведения вскрышных работ на угольном разрезе в нотации ARIS eEPC сводится к определению того, какая из подсистем («человек», «машина», «среда») вносит наиболее существенный вклад в причинную цепь предпосылок к реализации риска в системе «Ч–М–С».

Результаты исследования. Метод имитационного моделирования применим для априорной оценки возможности реализации риска и его развития в техногенные происшествия. При этом соблюдается требование к массовости и стохастичности исследуемого процесса, что позволяет использовать имитационное моделирование для прогнозирования реализации риска и параметров аварийности и травматизма.

На первом этапе процесса моделирования модель вскрышного забоя из нотации eEPC транслируется в комбинированную модель программной среды AnyLogic, что позволяет определить вероятности наступления событий в правилах ветвления «исключающее ИЛИ» (XOR) и «ИЛИ» (OR). На основе предложенного метода строится модель в AnyLogic. После получения структуры комбинированной имитационной модели определяются численные характеристики объектов модели, необходимые для

проведения имитационного моделирования: показатели для функций eEPC (время выполнения работ), количество исполнителей (организационные единицы), вероятности наступления событий в правилах ветвления, вероятности для XOR и OR. Описание соответствия объектов модели нотации eEPC и элементов комбинированной имитационной модели на языке AnyLogic приведено в таблице 1.

Таблица 1

Описание соответствия объектов модели нотации eEPC и элементов комбинированной имитационной модели на языке AnyLogic

Объект модели eEPC	Графическое обозначение	Соответствующий элемент AnyLogic	Описание элемента AnyLogic
Функция (Function) $F \in X \in G$	Function	Состояние (State) $S_t \in S_{ch} \in A \in ABM$ state	Простое состояние стейтчарта (диаграммы состояний)
Начальное событие (Event) $S_s \in S \in X \in G$	Event	Переход (Transition) $T_{rn} \in S_{ch} \in A \in ABM$	Переход из гиперсостояния стейтчарта в простое состояние. Также может определяться по таймеру, заданному аналитиком
Событие (Event) S_m, $Sf \in S \in X \in G$			
Материальные ресурсы			
Операция (Product/ Service) $P \in X \in G$	Operation/Service	Переменная (Variable) $Var \in E \in A \in ABM$ variable	Переменные используются для моделирования изменяющихся характеристик и для хранения результатов моделирования. Изменение количественных ресурсов происходит в состояниях стейтчарта, программируется на языке Java
Правила ветвления			
Правило ИЛИ (OR rule) $R_{or} \in R \in X \in G$	OR	Переход (Transition) $T_{rn} \in S_{ch} \in A \in ABM$	При переходе из простого состояния стейтчарта в гиперсостояние в методе перехода Action на языке Java программируется логика принятия агентом решения
Правило исключающего ИЛИ (XOR rule) $R_{xor} \in R \in X \in G$	XOR		

В качестве прототипа агентов используются комбинации операций eEPC, которые выполняются в каждой из подсистем «человек», «машина», «среда». Поведение агентов реализовано модулями «операция», «функция», «событие». Переход между операциями осуществляется с временной задержкой, которая определяется стохастически, то есть каждой простой операции задана задержка времени по передаче сигнала к следующей операции. Эта задержка описана соответствующей данной операции функцией распределения вероятности. Вероятностная логика правил ветвления XOR и OR реализуется при переходе между операциями и запрограммирована в соответствующих стохастических узлах модели.

Для технологических операций процесса вскрышных работ функция распределения вероятности времени ее выполнения определена исходя из следующих показателей:

– статистические данные, полученные по результатам проведения хронометражных наблюдений;

– расчетные параметры (расчет интервалов времени операций на основе статистических данных);

– экспертные суждения. При отсутствии статистических данных принималось экспертное значение функции распределения времени операций или вероятности события для стохастического узла. Пример выбора функции распределения вероятности для имитационной модели приведен в таблице 2.

Таблица 2

Пример выбора функции распределения вероятности

Событие	Функция распределения вероятности	Логика выбора функции распределения
Дискретные переходы от приемки смены до начала цикла горно-выемочных работ. Интервалы переходов между операциями выражаются во временных единицах, мин., час.		
Проверка технической готовности экскаватора, мин.	Равномерная (3, 7)	Интервал времени выбран на основании проведённого хронометража
Восприятие и переработка информации машинистом во время выполнения цикла выемочно-погрузочных работ. Интервалы переходов между операциями выражаются во временных единицах, с.		
Визуальный контроль состояния забоя, мин.	Равномерная (1, 3)	Интервал времени выбран на основании проведённого хронометража
Реализация риска при выполнении вскрышных работ. Интервалы переходов между операциями выражаются во временных единицах, с., мин.		
Срабатывание защиты экскаватора для шарикового клапана, с.	Экспоненциальная (166.67, 0.005)	Экспертная оценка Время открытия предохранительного клапана рассматривается как случайное событие. Время открытия предохранительного клапана является случайной величиной со средним значением (математическим ожиданием) μ, функция плотности вероятности экспоненциального распределения имеет вид $f(x) = \lambda * \exp(-\lambda x)$, где x — время открытия клапанов, $\lambda = 1/\mu$ — параметр интенсивности. Время открытия предохранительного клапана (x) составляет от 5 до 15 мс. при скорости движения замыкающего органа от 10 до 30 см/с. Наибольшее быстродействие имеют шариковый и конический клапаны, которые срабатывают за 6 и 8 мс. соответственно. Для предохранительного клапана учтено ограничение времени срабатывания в течение 0,9 с. для избегания поломки исполнительного органа. Значение λ (интенсивность) рассчитано как обратное значение времени открытия: для шарикового клапана: λ = 166.67 мс., для конического клапана: λ = 125 мс.
Вероятности наступления событий в правиле ветвления XOR и OR		
Точность реакции машиниста	Выход true: Гамма (1, 1.42857142857, 0.7)	Экспертная оценка Для моделирования используем гамма-распределение, так как оно позволяет определить вероятности продолжительности времени до определенного события, т. е. реакцию машиниста на отклонения в экстремальных условиях. $X = 0.7$ — это срытое время реакции + переработка единицы информации = 42 с. или 0,7 мин. Так как статистические данные или экспертные оценки отсутствуют, то приняты предположительные значения для параметров α = 1 и $\beta = 1/x = 1/0{,}7 = 1{,}42857142857$ (обратное значение минимального времени реакции).

Поведение агента «Среда» задается диаграммой состояния (код на языке Java, который в случайном порядке генерирует изменения погоды: дождь или ветер). Простые условия диаграммы состояния соответствуют функциям eEPC. Диаграмма состояния агента состоит из нескольких простых состояний, в которые переходит агент после выполнения каждой функции. Вероятностная логика правил ветвления XOR и OR реализуется в методе перехода Action на языке Java при смене состояний.

Страница запуска имитационной модели в AnyLogic представлена на рис. 3. При инициации простого эксперимента в среде AnyLogic модель запускается с заданными значениями параметров, поддерживает режим времени, анимацию и отладку модели. Перед началом запуска необходимо выбрать дату начала эксперимента, время и количество машинистов в смене. Количество машинистов в смене по умолчанию равно количеству забоев и количеству экскаваторов в смене.

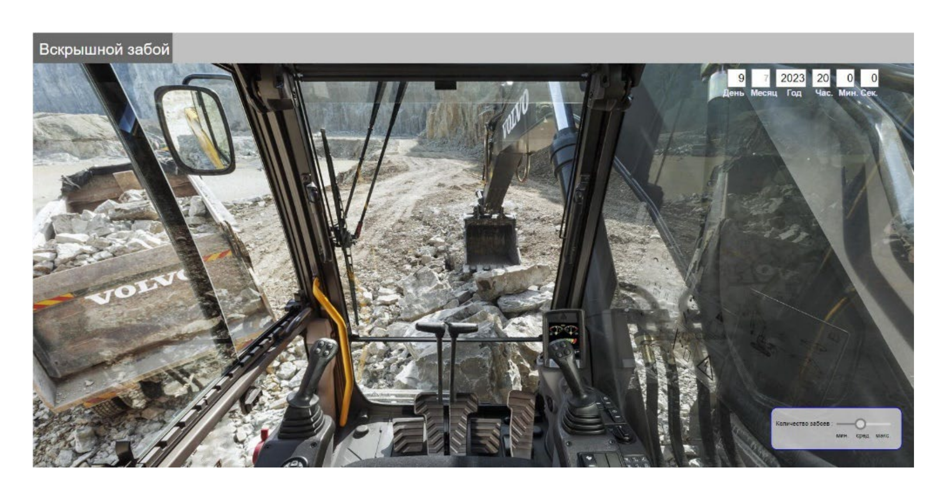


Рис. 3. Страница запуска симуляции комбинированной имитационной модели вскрышного забоя

Фрагмент модели (приемка смены) на основе модели eEPC, её активные объекты и окружение представлены на рис. 4. Активные объекты представляют собой сущности, которые могут выполнять действия, изменять своё состояние и взаимодействовать друг с другом внутри модели. Они представляют собой элементы, которые имеют собственное поведение и могут воздействовать на другие объекты и элементы модели. Окружение — это область, в которой активные объекты выполняют свои действия, перемещаются и взаимодействуют друг с другом (например, физическое пространство — вскрышной забой, кабина экскаватора). В среде дискретно-событийного окружения активные объекты обрабатывают события, изменяют своё состояние и взаимодействуют через событийные очереди.

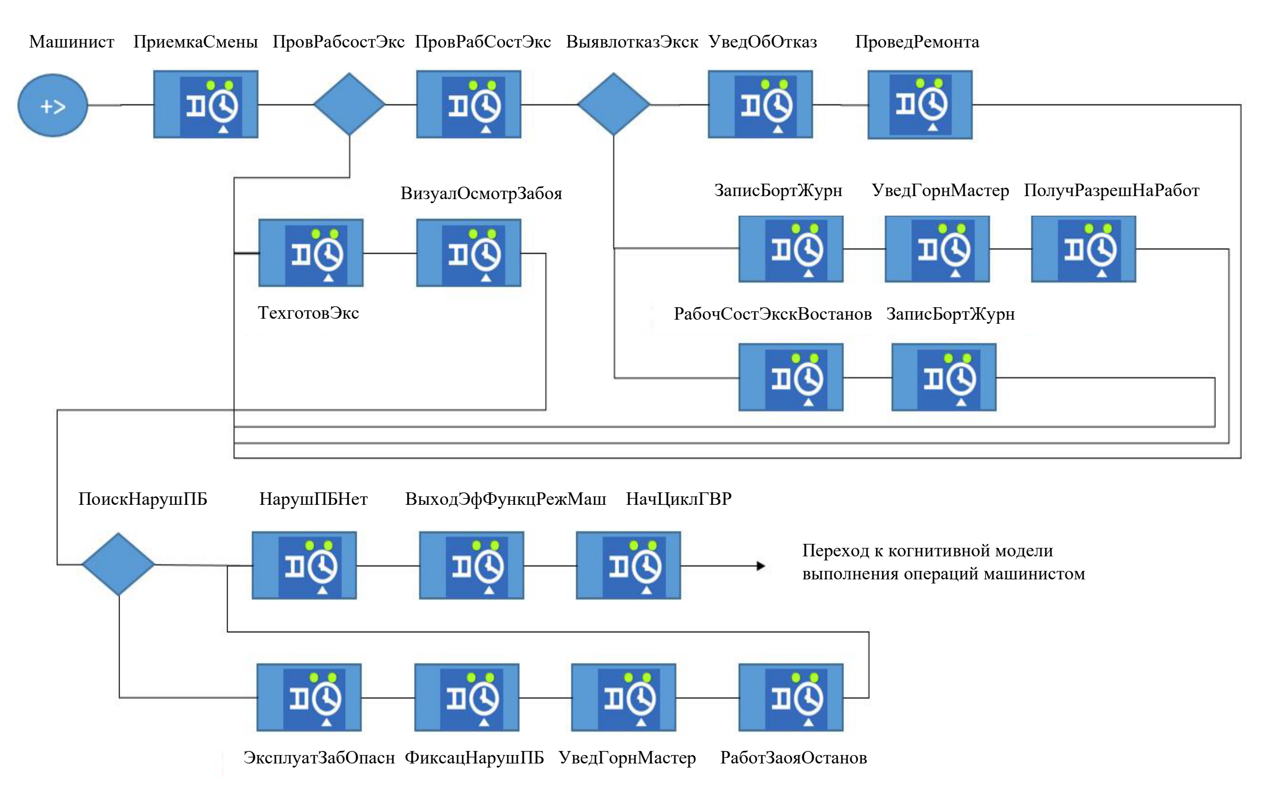


Рис. 4. Активные объекты и их окружение в комбинированной имитационной модели AnyLogic

Результаты сравнения данных моделирования процесса возникновения риска и его перерастания в причинно-следственную последовательность катастрофической аварии и травмирования персонала в системе «Ч–М–С» угольного разреза представлены в таблицах 3–9. Имитационные исследования в системе AnyLogic проводились за одинаковый модельный промежуток времени (11 модельных часов — длительность смены) и с одинаковыми входными данными (с проведением 10 экспериментальных одинаковых прогонов модели). В каждом из экспериментов количество машинистов, экскаваторов и забоев равнялось 5 в смену.

Таблица 3

Статистика показателей надежности подсистемы «машина» и «среда»
в системе «Ч–М–С» угольного разреза при приемке смены, в %

№ эксперимента/ операция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Подсистема «среда»											
Эксплуатация забоя небезопасна	11	5	10	6	15	13	13	16	13	24	13
Эксплуатация забоя безопасна	89	95	90	92	85	87	87	84	88	76	87
Подсистема «машина»											
Аварийный отказ	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Сложные неисправности	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Устраняемые неисправности	–	100	–	–	100	–	–	–	100	–	100
Время в работе	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Время в ремонте	–	–		–	–	–		–	–	–	–

При приемке смены машинистами выявлялись устраняемые неисправности, которые не повлияли на внеплановые простои экскаваторов, вследствие чего экскаваторы все время находились в работе.

В 87 % случаев при приемке смены машинисты не выявляли нарушения требований правил промышленной безопасности в забое. В 13 % случаев нарушения выявлялись, что приводило к простою вскрышного забоя «до устранения нарушений».

Таблица 4

Статистика причин снижения надежности подсистем «машина», «среда»
при выполнении цикла выемочно-погрузочных работ, в %

№ эксперимента/ операция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Подсистема «среда»											
Допущено нарушений по человеческому фактору	46	61	52	67	53	60	64	65	56	48	57
Допущено нарушений по причине неудовлетворительного состояния внешней среды	54	39	48	33	47	40	36	35	44	52	43
Подсистема «машина»											
Допущено отказов при эксплуатации	21	9	25	31	18	24	16	17	25	20	21
Допущено отказов по причине плохой организации работ	79	91	75	69	82	76	84	83	75	80	79

Во время осуществления цикла выемочно-погрузочных работ в ходе визуального контроля машинистами выявлялись отклонения в работе экскаватора и допускались локальные нарушения требований промышленной безопасности во вскрышном забое. Порядка 57 % нарушений в забое приходилось на человеческий фактор, что связано с недостаточно эффективной организацией работ эксплуатирующего персонала (отсутствие должного контроля со стороны линейного ИТР, приостановка работ из-за нарушений). Аналогично недостаточно эффективная организация работ влияла на отказы экскаватора в процессе выполнения работ (непроведение плановых ремонтов, работа на отказ).

Таблица 5

Статистика реакции машиниста на выход системы «Ч–М–С» из динамического равновесия, в %

№ эксперимента/ операция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Полное устранение отклонения	44	46	42	55	56	56	55	63	46	49	51
Частичное устранение отклонения	24	26	32	22	25	27	18	20	22	30	25
Отклонение устранить невозможно	32	28	26	22	19	17	27	17	32	21	24

В ходе реализации внештатных ситуаций в 51 % случаев машинисты полностью устраняли отклонения от нормального режима эксплуатации экскаватора и забоя. При этом доля частично устранённых нарушений и нарушений, устранить которые не удалось, примерно одинакова.

В строках таблицы 6 через дробь представлены статистические данные о действиях машиниста при нарушении динамического равновесия системы по следующим сценариям: 1 — «выполнено частичное устранение возникших отклонений», 2 — «отклонения устранить невозможно».

Таблица 6

Статистика действий машиниста на выход системы «Ч–М–С» из динамического равновесия, в %

№ эксперимента/ операция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Точное действие	–/–	7/10	10/–	–/1	–/–	9/14	8/–	7/–	7/5	–/–	8/7
Ошибочное действие	100/100	93/90	90/100	17/16	96/100	91/86	92/100	93/100	93/91	100/100	86/88
Бездействие	–/–	–/–	–/–	–/–	6/–	–/–	–/–	–/–	–/5	–/–	6/5

При частичном устранении отклонения в 86 % случаев попытки машинистов стабилизировать работу системы «Ч–М–С» были ошибочны и только в 8 % успешными. Как следствие, ошибочные действия приводили к росту доли отклонений, которые устранить не удалось.

Таблица 7

Статистика альтернативных исходов модели, в %

№ эксперимента/ тип исхода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Неблагоприятное воздействие внешней среды	24	22	23	16	24	24	20	19	26	30	23
Отказ экскаватора	12	4	14	16	8	11	7	9	10	7	10
Неэффективная организация работы	43	41	38	32	40	38	42	41	28	35	38
Эксплуатирующий персонал	22	33	25	36	28	27	31	31	36	28	30

Наиболее часто комбинированная модель реализовывала альтернативные исходы, связанные с неэффективной организацией работ и эксплуатирующим персоналом. Таким образом, человеческий фактор являлся основной причиной потери динамического равновесия системой «Ч–М–С» при имитационном моделировании вскрышного забоя.

Таблица 8

Статистика по реализации типа риска в системе «Ч–М–С» угольного разреза, в %

№ эксперимента/тип исхода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Опасная ошибка	53	55	33	61	55	61	55	48	46	68	53
Опасный отказ	45	40	61	36	39	39	42	48	49	32	43
Эксплуатирующий персонал	3	5	6	3	6	0	3	4	6	–	4

По статистике, чаще всего реализовывался риск, связанный с допущением опасной ошибки машинистами в ходе выполнения вскрышных работ, его доля составила 53 %. На долю опасного отказа экскаватора пришлось 43 % случаев, на эксплуатирующий персонал — 4 %. Таким образом, триггером развития риска является человеческий фактор по причине недостаточно эффективной организации работ. Действие человеческого фактора усиливается ошибкой машиниста в процессе работы, что может приводить к эффекту домино при реализации рисков.

В строках таблицы 9 через дробь представлены результаты моделирования трех исходов эксперимента при реализации риска: 1 — «опасная ошибка», 2 — «опасный отказ», 3 — «нерасчетное внешнее воздействие».

Таблица 9

Статистика исходов эксперимента при реализации риска по трем сценариям, кол-во случаев

№ эксперимента/ тип исхода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Итого
Наступило опасных ситуаций	20/ 17/ 1	29/ 21/ 3	12/ 22/ 2	20/ 12/ 1	17/ 12/ 2	20/ 13/ –	17/ 13/ 1	12/ 12/ 1	16/ 17/ 2	15/ 7/ –	178/ 146/ 13
Устранено опасных ситуаций	19/ 17/ 1	26/ 18/ 3	12/ 21/ 1	17/ 12/ 1	16/ 10/ 1	20/ 13/ –	16/ 12/ 1	9/ 10/ 1	16/ 16/ 2	14/ 6/ –	165/ 135/ 11
Отказ подсистемы «человек»	–/ –/ –	1/ 1/ –	–/ 1/ –	3/ –/ –	–/ –/ 1	–/ –/ –	–/ 1/ –	1/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	5/ 3/ 1
Катастрофа	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –
Инцидент, авария, отказ	–/ –/ –	1/ 1/ –	–/ 1/ –	3/ –/ –	–/ –/ 1	–/ –/ –	–/ 1/ –	1/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	5/ 3/ 1
Травмирование персонала	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –
Отказ подсистемы «машина»	1/ –/ –	2/ 2/ –	–/ –/ 1	–/ –/ –	1/ 2/ –	–/ –/ –	1/ –/ –	2/ 2/ –	–/ 1/ –	1/ 1/ –	8/ 8/ 1
Катастрофа	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –
Инцидент, авария, отказ	1/ –/ –	2/ 2/ –	–/ –/ 1	–/ –/ –	1/ 2/ –	–/ –/ –	1/ –/ –	2/ 2/ –	–/ 1/ –	1/ 1/ –	8/ 8/ 1
Травмирование персонала	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –

Анализируя результаты моделирования исхода риска «Опасная ошибка», можно сделать вывод, что в 93 % случаев систему удавалось привести к динамическому равновесию за счет срабатывания защиты экскаватора и точной реакции машиниста. Тем не менее, защита экскаватора отказывала чаще, вследствие чего на реализацию данного риска большее влияния оказала подсистема «машина». В свою очередь, отказ защиты экскаватора может возникать вследствие несвоевременного проведения плановых ремонтов либо непроведения плановых проверок срабатывания штатных защит и блокировок экскаватора, что является следствием воздействия человеческого фактора.

При реализации исхода риска «Опасный отказ» привести систему в динамическое равновесие удавалось в 92 % случаев. При этом отказы подсистемы «машина» также составляют основную причину наступления рискового события «Инцидент/авария/отказ».

При реализации исхода риска «Нерасчетное внешнее воздействие» привести систему в динамическое равновесие удавалось в 85 % случаев. При этом зарегистрировано по одному отказу у подсистемы «человек» и подсистемы «машина».

Обсуждение и заключение. На основе результатов имитационных экспериментов по моделированию процесса возникновения риска и его перерастания в причинную цепь катастрофической аварии и травмирования персонала в системе «Ч–М–С» угольного разреза сделан вывод, что наиболее существенный вклад в предпосылки к реализации риска в системе «Ч–М–С» вносит подсистема «человек». Несмотря на то, что при реализации исходов «Опасный отказ» и «Опасная ошибка» риски «Инцидент/авария/отказ» наступали по причине снижения надежности подсистемы «машина», вызывались они действиями или бездействием персонала, то есть человеческим фактором.

Снижение надежности подсистемы «среда», по результатам имитационного эксперимента, на 57 % обусловлена человеческим фактором (умышленные отклонения от проекта производства работ, допущение нарушений в гонке за объемами). И только 43 % обусловлено последствиями неудовлетворительного состояния забоя. В свою очередь, неудовлетворительное состояние забоя является следствием низкий исполнительской дисциплины машиниста в совокупности с недостаточно эффективным производственным контролем со стороны линейных инженерно-технических работников.

Снижение надежности подсистемы «машина» также является следствием влияния человеческого фактора, так как отказы горнотранспортного оборудования в 79 % случаев происходили по причине недостаточно эффективной организации работ, что приводило к росту внеплановых простоев основного технологического оборудования.

Также следует отметить, что в ходе имитационных экспериментов не наблюдалось реализаций риска аварий с катастрофическими последствиями и травмированием персонала при выполнении вскрышных работ. Из этого факта можно сделать следующие выводы:

1. Применяемые в процессе вскрышных работ меры безопасности и контроля эффективны и успешно предотвращают возникновение серьезных аварий или травм.

2. Использовалась модель безопасности или методология работы, которая демонстрирует высокую эффективность в предотвращении потенциально опасных ситуаций.

3. Результаты экспериментов свидетельствуют о компетентном обучении персонала правилам безопасного выполнения вскрышных работ и строгом соблюдении установленных процедур.

4. Отсутствие случаев травмирования персонала указывает на то, что все системы и оборудование функционируют на уровне, удерживающем риск травмирования на предельно-допустимых значениях.

При этом следует подчеркнуть, что абсолютное отсутствие катастроф и травмирования персонала за время прогона имитационной модели не гарантирует полной безопасности будущих операций. Для подтверждения результатов имитационных экспериментов и дальнейшего обеспечения безопасности рекомендуется проводить систематическую оценку рисков, анализировать предыдущие инциденты и постоянно совершенствовать механизмы и процедуры, нацеленные на удержание/повышение уровня безопасности на угольном разрезе.

Технологии имитационного моделирования впервые в отечественной практике исследований системы «Ч–М–С» получили приложение для анализа показателей комплексной безопасности при проведении открытых горных работ. Представленные результаты и апробация технологии имитационного моделирования могут широко использоваться при анализе безопасности сложных технических систем с учетом влияния человеческого и техногенного факторов.

Список литературы

1. Баришполец В.А., Махутов Н.А., Беккер А.Д., Бобров Ю.В., Власов Ю.В., Гаденин М.М. и др. *Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность сложных «человеко-машинных систем»*. Баришпольц В.А. (ред.). Монография. Москва: МГОФ «Знание»; 2021. 432 с.

2. Махутов Н.А. *Безопасность России. Человеческий фактор в проблемах безопасности*. Москва: МГФ «Знание»; 2008. 688 с.

3. Щирый А.О. Совмещение событийной и пошаговой схем дискретного имитационного моделирования. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2022;(12):338–342. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-12-338-343

4. Хемди А Таха. *Введение в исследование операций*. Москва: Издательский дом «Вильямс»; 2005. 912 с.

5. Зырянов А.А., Доррер М.Г. Оценка показателей бизнес-процессов на основе GERT-сетей. *Хвойные бореальной зоны.* 2012;30(5–6):57–63. URL: https://hbz.sibsau.ru/page/archive (дата обращения: 12.09.2023).

6. Зырянов А.А., Доррер М.Г. Трансляция модели бизнес-процессов в нотации ARIS eEPC в GERT-сеть. В: *Труды XI международной конференции по финансово-актуарной математике и эвентологии безопасности (ФАМЭБ'2012).* Красноярск; 2012. С. 187–197. URL: http://fam.conf.sfu-kras.ru/adds/XI-fames-2012-05-16-e-version.pdf (дата обращения: 09.09.2023).

7. Шеер А.-В. *ARIS-моделирование бизнес-процессов.* 3-е изд. Москва: Издательский дом «Вильямс»; 2009. 223 с.

8. Глухова К.И., Бекмансурова А.Р., Кучина Т.Н. Порядок действий при автоматизации бизнес-процессов. *Chronos: естественные и технические науки.* 2020;5(33):9–10. https://doi.org/10.24412/2712-9691-2020-533-9-10

9. Штыкова А.С. Обзор некоторых возможностей среды Anylogic. *Форум молодых ученых.* 2017;2(6):301–306.

10. Доррер М.Г., Ланцев Е.А., Шаргаева А.И. Событийный анализ бизнес-процессов в нотации eEPC. В: *Труды XV Международной конференции по эвентологической математике и смежным вопросам.* Красноярск; 2011. С. 89–96. URL: https://sciup.org/140277916 (дата обращения: 09.10.2023).

11. Ланцев Е.А., Доррер М.Г. Получение агентной имитационной модели из дискретно-событийного описания бизнес-процесса. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление.* 2013;3(174):44–52. URL: https://infocom.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2013/3/05_lantsev.pdf (дата обращения: 09.10.2023).

References

1. Barishpolets VA, Makhutov NA, Bekker AD, Bobrov YuV, Vlasov YuV, Gadenin MM, et al. *Bezopasnost' Rossii. Pravovye, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty. Bezopasnost' slozhnykh cheloveko-mashinnykh sistem.* Barishpolets V.A. (red.). Monograph. Moscow: IHPF Znanie; 2021. 432 p. (In Russ.).

2. Makhutov NA. *Security of Russia. The human factor in security problems.* Moscow: IHPF Znanie; 2008. 688 p. (In Russ.).

3. Shchiryi AO. Sovmeshchenie sobytiinoi i poshagovoi skhem diskretnogo imitatsionnogo modelirovaniya. *News of the Tula state university. Technical sciences.* 2022;(12):338–342. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-12-338-343 (In Russ.).

4. Khemdi A Takha. *Vvedenie v issledovanie operatsii.* Moscow: Williams Publishing house; 2005. 912 p. (In Russ.).

5. Zyryanov AA, Dorrer MG. Otsenka pokazatelei biznes-protsessov na osnove GERT-setei. *Conifers of the boreal area.* 2012;30(5–6):57–63. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-pokazateley-biznes-protsessov-na-osnove-gert-setey/viewer (accessed: 12.09.2023). (In Russ.).

6. Zyryanov AA, Dorrer MG. Translyatsiya modeli biznes-protsessov v notatsii ARIS eEPC v GERT-set'. In: *Proceedings of XI international conference on financial and actuarial mathematics and eventology of safety.* Krasnoyarsk; 2012. P. 187–197. URL: http://fam.conf.sfu-kras.ru/adds/XI-fames-2012-05-16-e-version.pdf (accessed: 09.09.2023). (In Russ.).

7. Sheer AV. *ARIS-modelirovanie biznes-protsessov.* 3-d ed. Moscow: Williams Publishing house; 2009. 223 p. (In Russ.).

8. Glukhova KI, Bekmansurova AR, Kuchina TN. Poryadok deistvii pri avtomatizatsii biznes-protsessov. *Chronos: estestvennye i tekhnicheskie nauki.* 2020;5(33):9–10. https://doi.org/10.24412/2712-9691-2020-533-9-10 (In Russ.).

9. Shtykova AS. Obzor nekotorykh vozmozhnostei sredy Anylogic. *Forum molodykh uchenykh.* 2017;2(6):301–306.

10. Dorrer MG, Lantsev EA, Shargaeva AI. Sobytiinyi analiz biznes-protsessov v notatsii eEPC. In: *Trudy XV Mezhdunarodnoi konferentsii po eventologicheskoi matematike i smezhnym voprosam.* Krasnoyarsk; 2011. P. 89–96. URL: https://sciup.org/140277916 (accessed: 09.10.2023). (In Russ.).

11. Lantsev EA, Dorrer MG. Creating agent-based model from the business process discrete-event model. *Computing, Telecommunication, and Control.* 2013;3(174):44–52. URL: https://infocom.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2013/3/05_lantsev.pdf (accessed: 09.10.2023). (In Russ.).

Поступила в редакцию 20.09.2023
Поступила после рецензирования 03.10.2023
Принята к публикации 06.10.2023

Об авторах:

Максим Александрович Ковалев, аспирант Красноярского филиала Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (660049, РФ, г. Красноярск, просп. Мира, 53), ORCID, kovalevmalk@gmail.com

Владимир Викторович Москвичев, доктор технических наук, профессор кафедры техносферной и экологической безопасности Сибирского федерального университета, директор Красноярского филиала Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (660049, РФ, г. Красноярск, просп. Мира, 53), SPIN-код: 9332-6468, ScopusID, ResearcherID, AuthorID, ORCID, krasn@ict.nsc.ru

Заявленный вклад соавторов:

М.А. Ковалев — описание теоретической части методологии исследования, проведение имитационного эксперимента в среде AnyLogic.

В.В. Москвичев — анализ корректности полученных результатов, рецензирование научной статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 20.09.2023
Revised 03.10.2023
Accepted 06.10.2023

About the Authors:

Maksim A. Kovalev, Postgraduate student, Krasnoyarsk branch of the Federal Research Center for Information and Computing Technologies (53, Mira Ave., Krasnoyarsk, 660049, RF), ORCID, kovalevmalk@gmail.com

Vladimir V. Moskvichev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Technosphere and Environmental Safety Department, Siberian Federal University, Director of the Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computing Technologies (53, Mira Ave., Krasnoyarsk, 660049, RF), ScopusID, ResearcherID, SPIN-code: 9332-6468, AuthorID, ORCID, krasn@ict.nsc.ru

Claimed contributorship:

MA Kovalev: description of the theoretical part of the research methodology, simulation experiment in the AnyLogic environment.

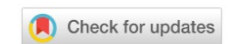
VV Moskvichev: analysis of the correctness of the results obtained, review of the scientific article.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 539.3 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-55-69

Обеспечение безопасности инфраструктуры газовых месторождений средствами ALARP и системного подхода

Ф.М. Дедученко ✉, А.Н. Дмитриевский
Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
✉ fmd11@mail.ru

Аннотация
Введение. Значимую часть мировой и государственной экономики составляет добыча и поставка углеводородного сырья. Актуальность вопросов безопасности в этой сфере сохранится в течение ближайших десятилетий. Проблема активно обсуждается в профессиональном и научном сообществе. Публикуются теоретические и прикладные работы. Просчитываются и внедряются локальные, точечные методы, которые позволяют предсказывать и предупреждать аварийные ситуации в определенных узлах рассматриваемых объектов. При этом нет достаточно обоснованных и воспроизводимых системных решений, способных учитывать состояние, например, нефтяного или газового промысла как единого комплекса и выступать индикаторами не только обычных локальных аварий, но и системных аварий — катастроф. Такое научно и экспериментально обоснованное решение описано в представленной статье. Подход предложен в рамках формирования комплексной научно-технической программы (КНТП) обеспечения безопасности природно-техногенных объектов (ПТО). Цель работы — описать практику его применения в условиях конкретных газовых промыслов и обосновать отказ от ориентации на решения, учитывающие только минимальный практически приемлемый риск, то есть построенные по принципу ALARP (англ. as low as reasonably practicable).

Материалы и методы. Исходными для статьи стали результаты проведенных с участием авторов натурных испытаний природно-техногенных объектов (ПТО) нефтегазового комплекса — Южно-Русского месторождения ОАО «Севернефтегазпром» (СНГП), ООО «Газпром добыча Ямбург» («ГДЯ») и газоперекачивающей станции (ГПА) «Орловка-2» (Украина). Значимые результаты получены и доказательно физически интерпретированы при приемо-сдаточных испытаниях сертифицированного на взрывобезопасность, созданного под руководством авторов прототипа системы противодействия развитию катастроф (СПРК) на установке комплексной подготовки газа (УКПГ) в ООО «ГДЯ в 2006 году. При этом впервые в мировой практике был актирован факт раннего обнаружения и парирования без последствий средствами СПРК на УКПГ-2 развития масштабной общепромысловой катастрофы.

В виде графиков визуализированы выявленные закономерности ПТО, позволившие сформировать предвестники развития аварий и катастроф на ПТО ООО «ГДЯ», СНГП и ГПС «Орловка-2». Представлена информация о высокой экспериментальной воспроизводимости полученных результатов.

Отработана технология раннего обнаружения и парирования всех типов потенциально опасных самовозбуждающихся системных явлений на реальных ПТО инфраструктуры — автоколебаний. Представлены три случая их возбуждения на реальных газовых промыслах.

Результаты исследования. Показана фрагментарность и локальность систем аварийной защиты ПТО, базирующихся на принципе ALARP. Следствием этого стала его полная непригодность для раннего обнаружения и противодействия самоорганизованно возбуждающимся наиболее масштабным и затратным системным авариям — катастрофам, представляющим собой процессы многофакторные, ни один из факторов в которых не является определяющим. Предложенное авторами и доведенное до рабочего состояния альтернативное комплексное решение проблемы базируется на адаптированном к ПТО нефтегазового комплекса системном подходе.

Техносферная безопасность

Обработаны и проанализированы измеряемые параметры разных ПТО инфраструктуры — промыслов ООО «ГДЯ» и СНГП в моменты развития на них автоколебательных режимов, обусловленных самоподдерживающимися нелинейными механизмами взаимодействия элементов ПТО с постоянными (не колебательными) источниками восполнения энергии. Проиллюстрировано три таких режима самовозбуждения. Наиболее информативными при этом оказались переходные режимы работы оборудования.
По экспериментально отработанным авторами технологиям были проанализированы области критических режимов работы оборудования с выраженными потенциально опасными точками бифуркации. Представлен результат наложения обработок измеряемых параметров восьми натурных испытаний ПТО — графиков безразмерных амплитудно-частотных характеристик взаимосвязей реальной динамической системы: «вход — корпус охлаждения газа» → «выход — трубная обвязка корпуса» на частоте автоколебаний.
Обсуждение и заключение. Возможности ALARP не отвечают задачам системного мониторинга возникновения и развития опасных инцидентов на газовых месторождениях. Этот вывод можно отнести ко всем типоразмерам ПТО инфраструктуры России. Для обеспечения комплексной наблюдаемости, управляемости, безопасности и защищенности ПТО следует задействовать принципиально иные решения. Рекомендована комплексная научно-техническая программа: «Инновационные программно-аппаратные средства и технологии в обеспечение наблюдаемости, управляемости, безопасности ПТО инфраструктуры России».

Ключевые слова: природно-техногенный объект, принцип ALARP, безопасность нефтегазовых промыслов, развитие системной аварии. противодействие развитию аварий

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Дедученко Ф.М., Дмитриевский А.Н. Обеспечение безопасности инфраструктуры газовых месторождений средствами ALARP и системного подхода. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(4):55–69. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-55-69

Original article

Ensuring Safety of Gas Field Infrastructure Using ALARP and a Systematic Approach

Feliks M. Deduchenko ✉, Anatolii N. Dmitrievskii
Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ fmd11@mail.ru.

Abstract
Introduction. A significant part of the global and state economy is the production and supply of hydrocarbon raw materials. The issues of safety in this area will remain important in the coming decades. The problem is actively discussed in the professional and scientific community. Theoretical and applied works are published. Local, point-based methods are calculated and implemented, which allow predicting and preventing emergencies in certain units of the considered objects. At the same time, there are no sufficiently justified and reproducible system solutions that can take into account the state of, for example, oil or gas field as a single complex and act as indicators not only of ordinary local accidents, but also of systemic accidents — catastrophes. Such a scientifically and experimentally based solution is described in this article. The approach is proposed as part of the formation of a comprehensive scientific and technical program (CSTP) to ensure the safety of natural and technogenic objects (NTO). The aim of this work was to describe the practice of its application in the conditions of specific gas fields and to justify the refusal to focus on solutions that took into account only the minimum practically acceptable risk, that is, built on the ALARP principle (as low as reasonably practicable).
Materials and Methods. The article was based on the results of field tests of natural and technogenic objects (NTO) of the oil and gas complex — the Yuzhno-Russkoye field of OJSC Severneftegazprom (SNGP), LLC Gazprom Dobycha Yamburg (GDYA) and the gas pumping station (GPS) Orlovka-2 (Ukraine), conducted with the authors' participation. Significant results were obtained and evidence-based physically interpreted during acceptance tests of an explosion-proof certified, created under the guidance of the authors of a prototype of a disaster response system (DRS) at the integrated gas treatment plant (IGTP) in LLC GDYA in 2006. At the same time, for the first time in the world practice, the fact of early detection and parrying without consequences by means of DRS on the UKPG-2 of the development of a large-scale general industrial disaster was confirmed.
In the form of graphs, the revealed patterns of NTO have been visualized, which made it possible to form harbingers of the development of accidents and catastrophes at the NTO of LLC "GDYA", SNGP and GPS "Orlovka-2". Information on the high experimental reproducibility of the obtained results was presented.

The technology has been developed of early detection and parrying of all types of potentially dangerous self-exciting systemic phenomena on real NTO infrastructure — self-oscillations. Three cases of their excitation in real gas fields were presented.
Results. The paper shows the fragmentary nature and locality of emergency protection systems based on the ALARP principle. The consequence of this was its complete unsuitability for early detection and counteraction to the most large-scale and costly system accidents — catastrophes that were multifactorial processes, in which none of the factors was decisive. The alternative complex solution of the problem proposed by the authors and brought to working condition was based on a system approach adapted to the NTO of the oil and gas complex.
The measured parameters of various NTO infrastructure — fields of LLC "GDYA" and SNGP were processed and analyzed at the moments of development of self-oscillating modes on them, due to self-sustaining nonlinear mechanisms of interaction of NTO elements with constant (non-oscillatory) sources of energy replenishment. Three such modes of self-excitation were illustrated. The most informative in this case were the transient modes of operation of the equipment.
According to the technologies experimentally developed by the authors, the areas of critical operating modes of equipment with pronounced potentially dangerous bifurcation points were analyzed. The result of superimposing treatments of the measured parameters of eight full-scale tests of NTO — graphs of dimensionless amplitude-frequency characteristics of the interconnections of a real dynamic system was presented: "input — gas cooling housing" → "output — pipe casing" at the frequency of self-oscillations.
Discussion and Conclusion. The capabilities of ALARP did not meet the tasks of system monitoring of the occurrence and development of dangerous incidents in gas fields. This conclusion can be attributed to all standard sizes of NTO infrastructure in Russia. Fundamentally different solutions should be used to ensure comprehensive observability, controllability, and safety of NTO. A comprehensive scientific and technical program is recommended: "Innovative hardware and software tools and technologies to ensure the observability, controllability, and safety of the NTO infrastructure of Russia".

Keywords: natural-technogenic object, ALARP principle, safety of oil and gas fields, development of a system accident, counteraction to the development of accidents

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Deduchenko FM, Dmitrievsky AN. Ensuring Safety of Gas Field Infrastructure Using ALARP and a Systematic Approach. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):55–69. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-55-69

Введение. По данным Центра исследований эпидемиологии катастроф (Centre for research on the epidemiology of disasters, CRED) практически все масштабные системные аварии фиксируются постфактум. Это свидетельствует о значительном объеме работ и усилий, которые нужны для обеспечения безопасности природно-техногенных объектов (ПТО) [1]. Следует подчеркнуть, что в данном случае безопасность представляет собой системное (интегральное) нелинейное качество сложной системы. Научные изыскания в этой сфере предполагают, в частности, пересмотр устойчивых стереотипов. Один из них — утверждение, что части определяют свойства всего объекта (в том числе и безопасность). Следует признать, что этот теоретический подход (в ряде случаев обоснованный) не находит практического подтверждения, если речь идет о проблематике, рассматриваемой в рамках данного исследования. В мире растут не только риски эпидемий и техногенных катастроф, но также реализация худших сценариев и связанные с ними колоссальные потери. Опыт последних лет доказывает крайне низкую осведомленность об особенностях таких процессов и невозможность влиять на них.

Первые в мировой практике полноценные системы аварийной защиты создали в России в 50–60-е гг. прошлого столетия. Их авторами были специалисты по созданию ракетных космических двигателей. В 1970–2010-е гг. в рамках конверсии этими уникальными достижениями смогли воспользоваться гражданские отрасли для решения проблем безопасности сложных общетехнических объектов инфраструктуры. В первую очередь наработки задействовали на объектах атомной и тепловой энергетики, в нефтегазовом комплексе, авиации. В сложившейся ситуации в 1995 году по инициативе НПО «Энергомаш имени академика В.П. Глушко» авторы представленной статьи сформировали межведомственную рабочую группу РАН в 2014 году ее узаконили решением Всероссийского научно-исследовательского института по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий).

Группа принимала участие в перечисленных ниже работах.

1. В 2006 году впервые в мировой практике создана система, которая прошла сертификацию на взрывобезопасность и позволяла противодействовать развитию реальной масштабной промышленной катастрофы.

2. В 2016 году разработана и прошла защиту Стратегия противодействия развитию катастроф.

3. В 2017 году по поручению президента РАН сформирована, научно и экспериментально обоснована, прошла защиту стратегия «Инновационные технология и средства защиты от техногенных аварий на промышленных объектах инфраструктуры России».

4. В 2021 году создан, научно и экспериментально обоснован, прошел защиту Комплексный научно-технический проект (КНТП) полного инновационного цикла «Инновационные программно-аппаратные средства и технологии в обеспечение наблюдаемости, управляемости, безопасности ПТО инфраструктуры России».

Подчеркнем, что постановка проблемы и ориентированные на ее решение технологии — результат работы сначала над Концепцией (по заданию руководства Всероссийского научно-исследовательского института по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, а затем над Стратегией РФ противодействия развитию катастроф (по решению Президиума РАН).

С точки зрения безопасности одна из существенных нелинейностей сложных многокомпонентных объектов инфраструктуры — нарушение принципа суперпозиции. Дело в том, что безопасность ПТО не определяется состоянием и функционированием образующих его элементов[1, 2, 3, 4].

Тем не менее, в реальных условиях эксплуатации ПТО мировая практика во многом остается, как и 100 лет назад, традиционной — локально ориентированной. Она строится на ошибочном принципе, согласно которому ПТО безопасен, если безопасны все его элементы. Этим обусловлена почти полная утрата контроля техногенных катастроф, которые в среднем на 4–5 порядков более затратные по последствиям в сравнении с локальными авариями в элементах ПТО. Лишь в последние десятилетия удалось понять, научно и экспериментально обосновать физические механизмы, управляющие такими инцидентами [1–4].

Отметим, что готова заявка на разработку КНТП полного инновационного цикла «Создание инновационных программно-аппаратных средств и технологий обеспечения наблюдаемости, управляемости и безопасности природно-техногенных объектов инфраструктуры России». Проект ориентирован на создание прорывных отечественных технологий повышения конкурентоспособности экономики во исполнение положений базовых документов стратегического развития России. Заявка согласована для представления в Совет по приоритетным направлениям научно-технологического развития РФ. В итоге в рамках общероссийской стратегии будет создана единая система природно-техногенной безопасности (ЕСПТБ) инфраструктуры России [1, 5, 6].

Цель работы — описать новую практику, реализованную в условиях конкретного газового промысла и обосновать отказ от ориентации на решения, учитывающие только минимальный практически приемлемый риск, то есть построенные по принципу ALARP (англ. as low as reasonably). Уточним, что перспективная, глобальная цель научных и прикладных изысканий авторов, в том числе описанных в данной статье, — создание в рамках Стратегии РФ объектно-ориентируемой Единой системы природно-техногенной безопасности (ЕСПТБ) инфраструктуры России, альтернативной выходной продукции согласно идеологии ALARP.

По данным Ростехнадзора РФ, при транспортировке жидких и газообразных углеводородов случаи локальных аварий на штатно эксплуатируемых предприятиях исчисляются сотнями и тысячами. В частности, зарегистрировано:

– 545 случаев разгерметизации на магистральных трубопроводах в течение последнего десятилетия XX века;

– 42 тыс. случаев разгерметизации на внутрипромысловых трубопроводах в течение только одного 2001 года.

Очевидно, что проблему может решить только масштабное и затратное организованное противодействие.

Первая в мире успешная практика реализована в России в 50–60-е гг. XX века — в сфере безопасности сверхмощных жидкостно-реактивных двигателей (ЖРД) космического назначения при доводочных и штатных огневых испытаниях [5]. Она известна как система аварийной защиты (САЗ).

В 80-е годы на Западе для общетехнических объектов создали аналогичную систему противоаварийной защиты (ПАЗ). Она основывается на принципе ALARP [6–9]), который неоднократно дорабатывался в России и

[1] *О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации* Указ Президента РФ № 683 от 31.12.2015. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_191669/ (дата обращения: 02.10.2023).
[2] *О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.* Указ Президента РФ № 642 от 01.12.2016 г. URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/41449 (дата обращения: 02.10.2023).
[3] *Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года.* Распоряжение Правительства РФ № 1512-р. от 6 июня 2020 г. URL: http://government.ru/docs/39844/ (дата обращения: 02.10.2023).
[4] То же.

его многочисленные российские версии[5] [8–10]). Отметим, что термин ALARP возник в 70-е годы в сфере британского законодательства о здоровье и безопасности на работе, то есть вне системного подхода. Как следствие, он сохранил многие характерные для того времени, но исчерпавшие себя особенности.

При этом политика безопасности добычи и транспортировки нефти и газа согласно принципу ALARP чаще касалась процедур оптимизации рабочих процессов. Эта практика реже применялась к собственно аварийной защите из-за более слабой научной и экспериментальной отработки вопросов, связанных с соответствующими процессами.

Материалы и методы. Исследование фокусируется на проблеме создания САЗ производственной цепочки добычи и транспортировки нефти и газа на основе принципа ALARP [11–13]. Он сопутствует проекту создания ЕСПТБ ПТО, поэтому в работе проводится сопоставительный анализ обоих подходов.

Как правило, проблемы безопасности решаются при взаимодействии:

– заказчика (потребитель выходной продукции);

– исполнителя (идеолог, разработчик и производитель выходной продукции);

– стороны, причастной к созданию ПТО (проектирующие организации и предприятия, реализующие проекты).

В общем случае объект исследования — открытая диссипативная динамическая система, объединяющая взаимозависимые и взаимодействующие друг с другом и с внешней средой элементы. Для обеспечения безопасности таких ПТО учитывались две взаимодополняющие информационные компоненты:

– элементы в составе ПТО (локальные аварии);

– ПТО в целом (комплекс взаимосвязанных элементов, локальные аварии и системные катастрофы).

Обязательный этап такой работы — согласование запроса заказчика и возможностей исполнителя.

Каждая компонента — это набор процессов с собственной энергетикой и индикацией.

Результаты исследования. Подчеркнем, что само по себе изучение элементов ПТО недостаточно информативно для понимания его состояния в целом [3–4]. Наблюдаемость, управляемость и безопасность ПТО как системы не определяется характеристиками составляющих его элементов, даже если все они учтены.

Так, согласно ALARP наиболее частая причина аварий и технологических катастроф — человеческий фактор. Это не соответствует современной точке зрения [3]. Тем не менее, принцип ALARP получил в России даже более широкое распространение, чем в Великобритании. Он, в частности, рекомендован ГОСТом для управления рисками[6].

Сложившаяся ситуация не отменяет сомнений в обоснованности ALARP. Ниже представлены его установки, обусловившие явные или скрытые ограничения для качественных исследований по безопасности ПТО.

1. Элементы ПТО не взаимодействуют между собой или их взаимодействием можно пренебречь. Это противоречит реальному положению дел. Все ПТО инфраструктуры, включая нефтегазовые комплексы, представляют собой многокомпонентные, сложные динамические системы. Они жизнеспособны только при управляемом, контролируемом взаимодействии элементов. То есть ошибочность утверждения легко опровергается практикой. Почему же от него не отказываются? Дело в том, что такой подход оправдывает упрощение процедуры суммирования рисков элементов ПТО для получения интегрального риска в целом по объекту.

2. Единственные материальные носители и источники опасности для инфраструктуры ПТО — это формирующие их элементы. Утверждение верно, но исключительно в отношении аварий локального типа. Правило не работает, если речь идет о системных авариях — катастрофах, которые обходятся дороже локальных в среднем на 4–5 порядков. Катастрофы — многофакторные явления. Это следствия нарушений нормального динамического взаимодействия элементов ПТО между собой, ПТО с собственной системой управления, ПТО со смежным оборудованием, ПТО с внешней средой и пр.

3. Источники опасности в элементах ПТО статистически взаимно независимы. Это предположение неправомерно в первую очередь в отношении наиболее тяжелых системных аварий — катастроф, которые возникают из-за нарушений взаимодействия элементов ПТО.

4. В качестве меры опасности элемента принят связанный с ним риск. Не учитываются другие, более значимые риски, обусловленные нарушениями взаимодействия элементов между собой и с внешней средой ПТО. Мера опасности ПТО как функциональной единицы определяется суммой рисков его элементов [6–11, 14]. Недопустимо суммировать риски, связанные с элементами ПТО. И дело не в том, что они обычно

[5] ГОСТ Р МЭК 61511–3–2011. *Безопасность функциональная. Системы безопасности приборные для промышленных процессов.* Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200094220 (дата обращения: 02.10.2023).

[6] ГОСТ Р 54505–2011. *Управление рисками на железнодорожном транспорте.* Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200094215 (дата обращения: 02.10.2023).

имеют разные размерности (с помощью матричного аппарата рисков размерность можно исключить [14]), а в статистической взаимозависимости источников опасности ПТО. По сценарию ALARP из этого положения нет выхода.

Как следствие, приходиться оперировать заниженными индикаторами рисков по сравнению с их действительными значениями, а значит, недооценивать реальные опасности для ПТО.

Сказанное выше позволяет сделать ряд утверждений.

– ALARP предлагает следовать устаревшему локальному подходу к решению проблем безопасности ПТО инфраструктуры, что ограничивает сферу его применения. Ситуация усугубляется умалчиванием непригодности ALARP для решения задач системного анализа состояния и поведения ПТО инфраструктуры.

– Специалисты, ориентированные на работу по ALARP, не располагают специальным инструментарием для исследования самих ПТО инфраструктуры, отработки элементов и в целом САЗ, а также для технического обслуживания выходного результата ALARP и т. п. Отметим, что такой инструментарий запланирован к разработке в рамках упомянутой ранее КНТП.

– У специалистов ALARP нет технологии, которая адекватно современной постановке задач может обеспечить требуемую информативность, управляемость и безопасность ПТО.

– Оснащение ПТО инфраструктуры системами аварийной защиты на базе ALARP не отвечает современному видению проблемы обеспечения безопасности ПТО.

Итак, главное упущение ALARP — отказ учитывать динамическое взаимодействие элементов в составе ПТО инфраструктуры.

Экспериментальные подтверждения чрезвычайной значимости динамического взаимодействия элементов ПТО нефтегазовых промыслов. Авторы представленной статьи занимают противоположную позицию и неоднократно получали подтверждение ее обоснованности при ведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в том числе конверсионных, призванных обеспечить техногенную безопасность гражданских объектов с учетом опыта космического двигателестроения. Одной из таких гражданских сфер стала добыча и транспортировка нефти и газа. Важно отметить, что авторы располагали уникальными профильными программно-аппаратными ресурсами и технологиями (в том числе собственной разработки).

Некоторые итоги натурных испытаний разных типоразмеров ПТО были получены впервые. Для передачи этих результатов и накопленного опыта ниже представлены доказательные данные о решающей роли процессов взаимодействия элементов ПТО. Они нужны для формирования информативных компонент рабочих процессов ПТО, а также могут быть предвестниками масштабных, часто самопроизвольно развивающихся аномалий вроде техногенных катастроф [1, 3]. В реальных условиях территориально распределенных нефтегазовых промыслов взаимодействия элементов прослеживались на расстояниях:

– порядка 10 м на объектовых уровнях безопасности;

– до 100 м на цеховых уровнях;

– до 10 км на промысловом уровне.

Авторы не проводили исследования на бóльших расстояниях между элементами.

Перечислим конструктивы производственных звеньев добычи и транспортировки нефти и газа, которые формируют динамические взаимодействия элементов ПТО:

– звенья — производители энергии (камеры сгорания, газогенераторы, цилиндры двигателей внутреннего сгорания и т. п.);

– преобразователи энергии (насосы, компрессоры, турбоагрегаты);

– взаимодействующие с другими звеньями внешние и внутренние обвязки цехов, байпасы, входные и выходные коллекторы;

– звенья — накопители энергии;

– устья скважин.

Приведенные в статье рис. 3–7 — это результаты анализа измеряемых параметров разных ПТО инфраструктуры, которые исследовала представляемая авторами Межведомственная рабочая группа РАН в ходе натурных испытаний.

Начнем с наиболее распространенных в нефтегазовом хозяйстве регулярных системных явлений — автоколебаний, обусловленных самоподдерживающимися нелинейными механизмами взаимодействия элементов ПТО с постоянными (не колебательными) источниками восполнения энергии. В описанных ниже случаях использовались результаты из собственного опыта авторов проведения натурных испытаний нефтегазовых объектов, хотя охват был существенно шире и включал ТЭС, ГРЭС, АЭС, производство и

эксплуатацию сверхмощных дизель-генераторов, турбодетандерных агрегатов (ТДА) и т. п.

Основное внимание уделялось вовремя обнаруженным эксцессам, которые, благодаря использованию технических средств, не переросли в аварии и катастрофы. Так, на Южно-Русском месторождении ОАО «Севернефтегазпрома» при фиксации мощного автоколебательного процесса динамического взаимодействия пары «наземный конструктив куста скважин → прилегающие недра» сработало аварийное отключение действующего куста скважин (рис. 1).

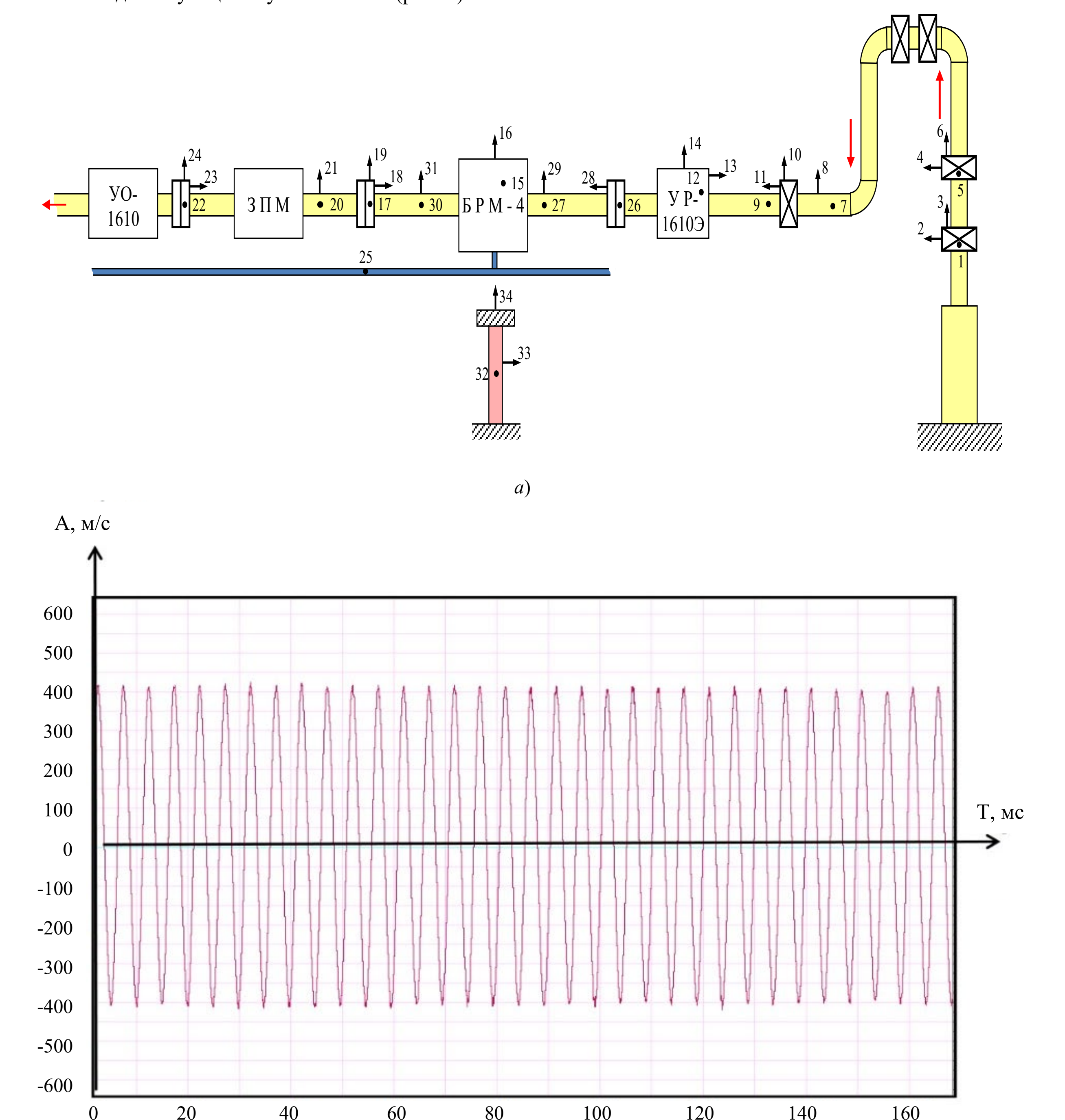


Рис. 1. Автоколебательный процесс динамического взаимодействия пары «наземный конструктив куста скважин → прилегающие недра», зафиксированный на Южно-Русском месторождении ОАО «Севернефтегазпром»: *а* — устье скважины, *б* — фрагмент вибрационного параметра трубной головки устья скважины в начальный момент самовозбуждения мощных природно-техногенных автоколебаний с частотой ≈ 200 Гц

Поясним, что в части *а*) представлен конструктив устья скважины с 34-канальной системой измерения и регистрации вибрационных параметров 2-й нитки 9-го куста скважин. Черными стрелками показаны места датчиков и направления измерений вибрационных параметров конструктива 2-й нитки 9-го куста скважин, красными — направление движения газового потока. Здесь УО — устройство отсекающее, ИБ — измерительный блок, БРМ — блок регулирования метанола, УР — устройство регулирующее.

Авторам статьи пришлось срочно отвлечься от основной работы и принять участие в прояснении природы опасного явления. Как показали последующие расчет и анализ металла из критических сечений, усталостная прочность металлоконструкции исчерпывалась в ближайшие 2–2,5 часа.

Дополнительная обработка результатов измерения параметров позволила установить дислокации:

– постоянного источника восполнения энергии (прилегающие недра куста скважины);

– нелинейного колебательного контура (куст скважин).

Авторы отработали соответствующие методику и программно-аппаратные средства применительно к космическому двигателестроению. На частоте возбуждения автоколебаний всех пар измеряемых вибрационных параметров устья скважины когерентность почти совпала с единицей.

На рис. 2 и 3 представлены место и характеристики случая самовозбуждения автоколебаний. Авторы зафиксировали его, когда проводили натурные испытания установки комплексной подготовки газа (УКПГ) в ООО «Газпром добыча Ямбург» («ГДЯ») в частотном диапазоне 36–56 Гц (зависит от режима работы).

Как автоколебания идентифицировали физический механизм — сильное динамическое взаимодействие оборудования корпуса осушки газа и его внешней обвязки. Наиболее информативными при этом оказались испытания на переходных режимах работы оборудования:

– медленного дросселирования от 100 % режима до 65 % (по времени от 550 сек до 750 сек);

– медленного последующего форсирования от 65 % режима до 85 % (по времени от 1200 сек до 1300 сек).



Рис. 2. На установке комплексной подготовки газа (УКПГ-2) произошло сильное нелинейное взаимодействие динамических звеньев «корпус осушки газа (справа, на втором плане) ⟶ внешняя обвязка»

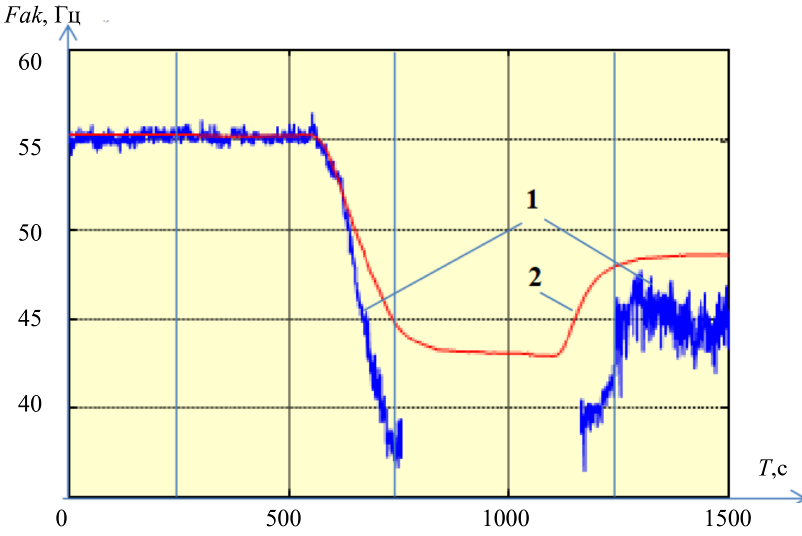


Рис. 3. УКПГ-2. Зависимость от времени частоты автоколебательного взаимодействия динамических звеньев «корпус осушки газа → его внешняя обвязка»: 1 — по данным обработки результатов натурных испытаний; 2 — по данным сопутствующего теоретического расчета

Уникальными по информативности и практической физической интерпретации обнаруженного явления оказались приемо-сдаточные испытания сертифицированного на взрывобезопасность прототипа системы

противодействия развитию катастроф (СПРК) на УКПГ-2 «ГДЯ» в 2006 году. Для подтверждения экспериментальной воспроизводимости результатов запланировали 10 однотипных натурных испытаний СПРК на режимах штатного форсирования и дросселирования. Единственным нежестким, как предполагалось, исключением было 8-е испытание. Отметим, что сложным системам присущи разные шкалы времени. В 8-м случае для получения большего, чем на предыдущих семи испытаниях, временного разрешения градиент процесса снизили более чем вдвое.

Ввиду исключительной важности результатов испытаний в дополнение к штатным измерениям программа регламентировала развертывание 96-канальной территориально распределенной системы измерения различных параметров работы объекта. На автоматизированном рабочем месте оператора СПРК в корпусе осушки газа параметры представлялись после групповой синхронизации и централизации (использовалась спутниковая система GPS).

Ярко выраженные точки бифуркации в рабочих процессах промысла (на режиме ≈ 18 % от номинала) привлекли внимание авторов задолго до приемо-сдаточных испытаний. Однако это явление ранее не вызывало эксцессов, поэтому испытания не отменили. На рис. 4 представлен результат наложения графиков восьми из запланированных десяти испытаний СПРК.

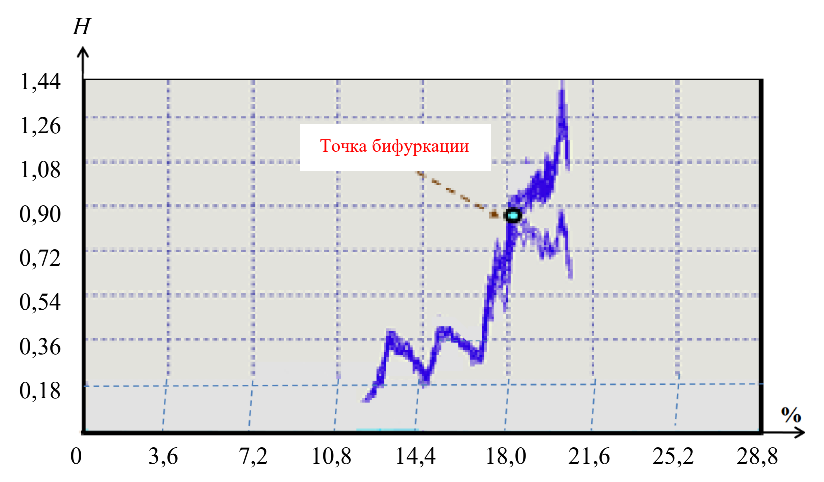


Рис. 4. УКПГ-2. Результат наложения обработок восьми натурных испытаний — графиков безразмерных амплитудно-частотных характеристик H взаимосвязей динамической системы: «вход — корпус охлаждения газа» → «выход — трубная обвязка корпуса» на частоте автоколебаний

Здесь на участках форсирования после прохождения точек бифуркации нижнюю ветвь кривой задействовали на испытаниях 1, 3, 4, 6, а верхнюю — на 2, 5, 7, 8.

Понятно, что размытость графика на рис. 4 (так же, как и графиков на рис. 6, 7 и 8 для других объектов) объясняется не ошибками измерений параметров ПТО, а наложениями результатоов обработок данных натурных испытаний, проведенных при одних и тех же значениях режимных параметров каждого объекта. При этом сама размытость графиков важна с точки зрения информативности. Она дает возможность:

– четко представить степень воспроизводимости результатов испытаний (или других параметров в зависимости от постановки задачи), то есть сделать выводы о корректности или некорректности решаемой задачи;

– взять для задач принятия решений о техническом и (или) функциональном состоянии ПТО обоснованные допуски в формах зависимости от режимных параметров ПТО во всем диапазоне или поддиапазонах значений.

На рис. 5 представлен фрагмент обработок результатов восьмого испытания в окрестности критической точки (18 % от номинала) на участке дросселирования с самопроизвольным развитием системной техногенной аварии. Тогда в корпусе охлаждения и осушки газа не было газовой автоматики, поэтому ситуацию корректировали вручную, с помощью байпаса. Использовали не общепринятую аварийную остановку, а обратное форсирование.

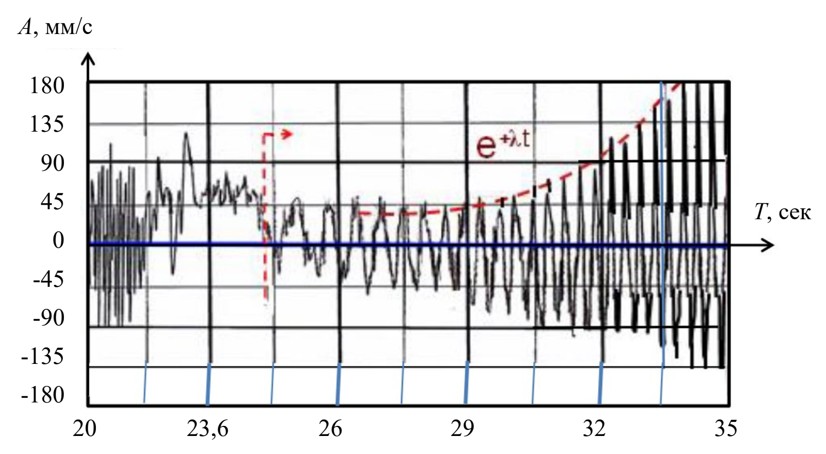


Рис. 5. УКПГ–2. Начальная стадия самопроизвольного развития системной аварии — катастрофы

Экспериментально определенный постфактум горизонт прогноза катастрофы оказался беспрецедентно большим — $\tau^* = 90$ сек при значениях показателей Ляпунова на участках возбуждения и гашения колебаний соответственно: $\lambda_1 = +0{,}14$ Гц и $\lambda_2 = -0{,}38$ Гц. Установили причину такого редкого явления в эксплуатации ПТО. Оно обусловлено обнаруженным (видимо, впервые в мировой практике) механизмом двухкаскадного сценария возбуждения и развития катастрофы. На первом шаге ранее установленного критического режима с точкой бифуркации, представленной на рис. 4, произошло цеховое системное возбуждение группы элементов промысла — турбодетандерных агрегатов во взаимодействии с внешней трубной обвязкой. Оно же сыграло роль спускового механизма на втором шаге, который характеризуется сильным взаимодействием устьев скважин с недрами.

Впоследствии развитие этой общепромысловой катастрофы квалифицировали как первое в мировой практике вовремя обнаруженное (что позволило принять меры противодействия) чрезвычайно опасное региональное техногенно-природное землетрясение магнитудой от 6 до 7 баллов по шкале Рихтера. Источником энергии были недра, конструктивы кустов скважин сработали как спусковой механизм. Определяющую роль сыграло выполненное вручную понижение градиента дросселирования на восьмом приемо-сдаточном испытании и, соответственно, увеличение времени пребывания промысла в опасной зоне — в окрестности критической точки бифуркации на режиме ≈ 18 % от номинала.

Сейчас стали всеобщей практикой отстройка от зон дислокации резонансных частот или их ускоренное преодоление на переходных режимах. В качестве примеров можно привести ЖРД космического назначения, АЭС, ГЭС, авиационную технику и т. п.

Исключительную важность представляют два фактора, реализованные во время приемо-сдаточных испытаний.

1. Системный подход к организации и проведению испытаний СПРК. Формирование пакета исходных экспериментальных данных для понимания сути механизма и противодействия развитию чрезвычайно опасного явления — общепромысловой катастрофы, которая территориально и по времени совпала с техногенно-природным землетрясением. Свойственный ALARP и его выходной продукции локальный подход в данном случае оказался не востребован.

2. Высокая информативность. Штатная система измерения параметров промысла получила дополнение. Задействовали территориально распределенную систему измерения параметров с групповой синхронизацией и централизацией параметров. Штатно измеряемые параметры промысла указали на развитие ЧС:

– за доли секунды до ее завершения, когда аварийная защита была невозможна;

– только по вторичным признакам в высокочастотном диапазоне (главные события фиксировались на низких частотах).

На рис. 6 представлены наложения результатов обработок двенадцати натурных испытаний турбодетандерных агрегатов в корпусе осушки газа УКПГ-2 ООО «ГДЯ» в течение полутора месяцев проведения ремонтных работ.

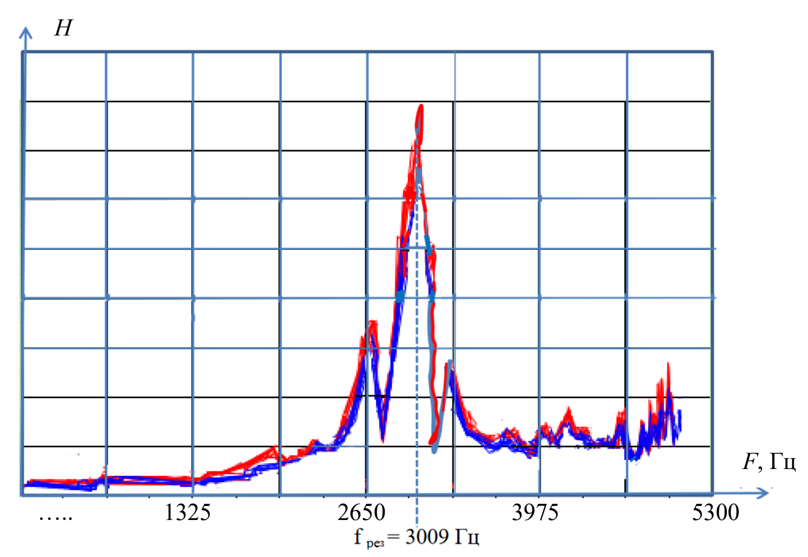


Рис. 6. Экспериментально воспроизводимые амплитудно-частотные характеристики динамической системы «ТДА-2 → ТДА-7»

В данном случае использовался созданный авторами двухканальный модульный блок высокоточного синхронного выделения частотных компонент $53F_p$ (53 — число лопаток турбин исследуемого типоразмера турбодетандерных агрегатов) в осевых вибрационных параметрах турбин ТДА-2 и ТДА-7. Действовали режимы медленного форсирования (кривые красного цвета) и дросселирования (кривые синего цвета) ТДА-2. Работа шла на номинальном штатном режиме ТДА-7.

Таким образом, налицо воспроизводящиеся в широком частотном диапазоне до 5300 Гц амплитудно-частотные характеристики резонансного типа (Fрез = 3009 Гц) потенциально опасного высокодобротного ($Q \approx 76{,}5$) динамического взаимодействия ТДА-2 и ТДА-7. Потребовалось разработать и реализовать серьезные мероприятия по противодействию. Кроме того, для подтверждения их эффективности проводились дополнительные натурные испытания. Это уникальный случай экспериментально воспроизводимого системного тестирования ТДА-2 на режимах запусков и остановок его динамического взаимодействия со смежным, работающим на номинальном режиме ТДА-7 в широком частотном диапазоне. Данный экспериментально отработанный подход и адекватную ему технологию можно использовать при эксплуатации любого оборудования роторного и (или) поршневого типов. Важно иметь ввиду, что формируемые по аналогичным характеристикам (см. рис. 6) предвестники развития на ПТО ЧС — системные. Они подходят для решения задач идентификации типа развивающейся аварии — локальной и системной (катастрофы).

На рис. 7 и 8 представлены экспериментально воспроизводимые системные закономерности взаимодействия газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Они отработаны на газоперекачивающей станции «Орловка-2» (Украина) и принципиально не отслеживаются системами, основанными на ALARP. Общее число натурных испытаний по рис. 7 (ГПА-1 → ГПА-2) — 14, по рис. 8 («ГПА-4 → ГПА-5») — 18.

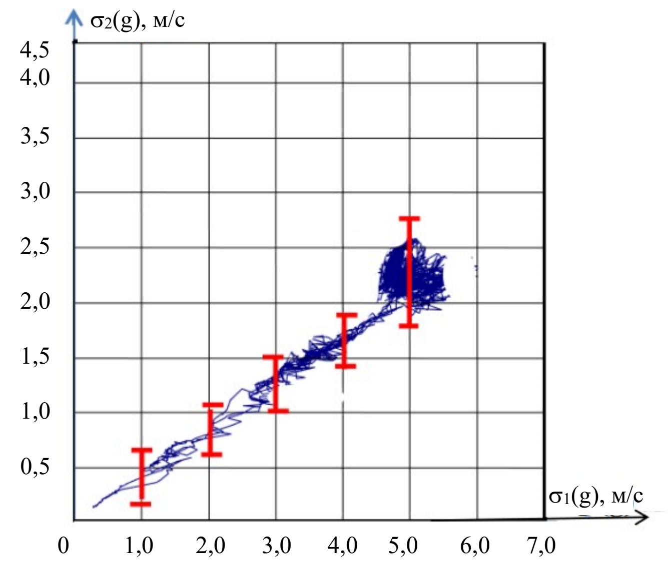


Рис. 7. ГПС «Орловка-2» (Украина). Воспроизводимые закономерности взаимодействия «ГПА-1 → ГПА-2»

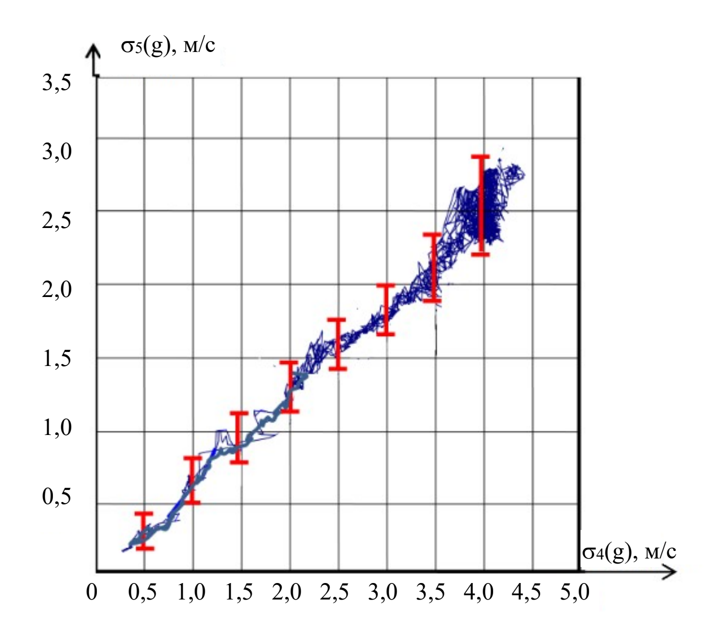


Рис. 8. ГПС «Орловка-2» (Украина). Воспроизводимые закономерности системного взаимодействия «ГПА-4 → ГПА-7»

На рисунках закономерности показаны в виде годографов в формах зависимости, измеряемых в горизонтальном и вертикальном направлениях среднеквадратических значений виброскоростей ГПА от суммарного расхода газа через ГПС — g. Для определенности выбрали частотный диапазон измерений среднеквадратичных значений 0,1–5 Гц. Согласно статистике, именно в этом диапазоне в конструктивах ПТО часто происходят процессы с крупной самоорганизованной концентрацией энергии, которые провоцируют развитие аварийных исходов — как локальных, так и более затратных системных. Несмотря на существенные отличия физических механизмов, в данном случае полученные результаты можно безальтернативно использовать при эксплуатации оборудования роторного типа, а при соответствующей адаптации — и не роторного.

Для разработки упомянутых выше прототипа СПРК и Стратегии РФ противодействия развитию системных аварий — катастроф [1, 3] существенно значимы:

– воспроизводимость результатов натурных испытаний;

– экспериментальная обоснованность статистически корректных прикладных результатов.

Отметим также важность ожидаемого специалистами типового сценария развития системных аварий разной физической природы. Для подтверждения воспроизводимости результатов потребовалось не менее десяти лет целевых научно-экспериментальных работ. Это позволило реализовать в СПРК и затем отразить в Стратегии РФ комплекс унифицированных алгоритмов и технических средств раннего обнаружения, мониторинга и защиты от всех типов техногенных аварий.

Отработано чрезвычайно важное качество этого комплекса — объектная ориентируемость (возможность глубокой адаптации практически к любым типоразмерам ПТО инфраструктуры).

Отметим также характерную для системного подхода особенность, которая позволяет делать верные выводы даже в том случае, если экспериментальная воспроизводимость результатов натурных испытаний ПТО представляется слабой или вообще не обнаруживается. Следует учитывать, что один и тот же элемент сложной системы (например, компрессор) демонстрирует разные свойства и поведение, даже если функционирует в составе одного ПТО. Это зависит от того, рассматривается ситуация до или после ремонта. Данный эффект легко спутать с плохой воспроизводимостью результатов испытания компрессора.

Результаты сопоставительного анализа систем аварийной защиты, адекватных принципу ALARP и системному подходу КНТП. Практически во всех публикациях, связанных с принципом ALARP, присутствуют условия, из которых исходит ALARP. По каким-то причинам они должны исполняться сами собой, и это повод для критики. Принцип ALARP можно безоговорочно использовать для класса объектов, представляющих собой наборы таких объектов, которые не связаны друг с другом, не взаимодействуют и статистически независимы. Таким образом, полезность ALARP ограничивается отдельными исследованиями вне системы каждого элемента ПТО. Так же, вне системы, рассматривается класс свойственных элементам локальных аварий. Принцип ALARP не подходит для адекватного исследования ПТО как цельной структуры, формирования адекватной симптоматики, алгоритмов принятия решений и т. п.

Используя любой инструментарий, базирующийся на идеологии ALARP (и САЗ в том числе), мы должны понимать, что идем на сознательное ограничение.

Единственным выходом представляется оперативное создание систем безопасности, альтернативных тем, которые ориентируются на ALARP. Базой для новых решений должен быть задел, сформированный для выполнения комплексной научно-технической программы «Создание инновационных программно-аппаратных средств и технологий обеспечения наблюдаемости, управляемости и безопасности природно-техногенных объектов инфраструктуры России».

Приведем основные аргументы готовности к созданию систем безопасности и аварийной защиты в рамках КНТП как альтернативы САЗ по идеологии ALARP.

– Созданы сертифицированные прототипы профессионального инструментария, в том числе во взрывобезопасном исполнении, для экспериментальной отработки компонент системы противодействия развитию аварий и катастроф.

– Системы аварийной защиты по КНТП базируются на совмещенных локальных и системных подходах к исследованию ПТО инфраструктуры в рамках теории самоорганизованной критичности [3].

– В системах аварийной защиты по КНТП учтено открытие 50–60-х гг. российского космического двигателестроения [6]. Речь идет о двух типах физической природы аварийных исходов. В современной терминологии их называют локальными (в элементах ПТО) и масштабными, системными (в ПТО как целостной функциональной единице). САЗ по схеме ALARP реагирует на развитие только малозатратных локальных аварий.

– Системы аварийной защиты по КНТП готовы к принятию мотивированных решений о начале развития в ПТО всех типов локальных аварий и системных аварий — катастроф. Это отличает их от САЗ по схеме ALARP, реагирующей только на локальные аварии.

– В системах аварийной защиты по КНТП достигнута готовность перевода ПТО в безопасное состояние по двум сценариям. Первый: перевод ПТО на щадящие режимы работы. Второй: аварийное отключение в порядке реагирования на мотивированные решения о развитии нештатных критических ситуаций.

– Сняты ограничения на сферу применения систем аварийной защиты по КНТП по типу выставляемых априорных условий для САЗ по схеме ALARP.

– В системах аварийной защиты по КНТП научно и экспериментально отработана симптоматика развития локальных, системных критических состояний ПТО и правил принятия решений о переводе ПТО в безопасное состояние.

– Достигнута готовность (при принятии соответствующего решения) отработки быстродействующего механизма перевода ПТО в безопасное состояние для наиболее опасных аварий взрывоподобного типа с характерным для них временем развития $\Delta t \approx 30–70$ мс.

Обсуждение и заключение. Рассмотрены системы аварийной защиты, разработанной по КНТП «Наблюдаемость, управляемость, безопасность ПТО инфраструктуры России». Оценены их возможности в условиях Северо-Западного региона РФ [1]. Новый подход сравнивается с распространенным на Западе и в России принципом ALARP.

Показано, что ALARP изжил себя, т. к. его локальная ориентация не отвечает задачам системного мониторинга ПТО инфраструктуры [8–14]. Подход ALARP остался на уровне, принятом, как минимум, 100 лет назад, в первой половине XX века. Именно так нужно оценивать разработки, реализуемые по схеме ALARP, и их выходную продукцию, в том числе системы аварийной защиты [8–14].

Исследования и практика свидетельствуют о том, что методология ALARP не обеспечивает комплексную наблюдаемость, управляемость, безопасность природно-техногенных объектов инфраструктуры. По этой причине подход, основанный на ALARP, не дает своевременной, качественной индикации развития разрушительных системных аварий — катастроф.

Системы аварийной защиты, создаваемые по предлагаемому проекту КНТП, интегрируют локальный и комплексный подходы к мониторингу инфраструктуры в рамках теории самоорганизованной критичности [3].

Показана перспективность замещения подходов на базе ALARP решениями, соответствующими КНТП.

Список литературы

1. Дедученко Ф.М. Технологические, экологические и организационные аспекты обеспечения природно-техногенной безопасности нефтегазовой отрасли России. В: *Пути реализации нефтегазового потенциала Западной Сибири. Материалылы XXV науч.-практ. конф.* Ханты-Мансийск: Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана; 2022. С. 12–28

2. Дмитриевский А.Н., Мастепанов А.М., Бушуев В.В. Ресурсно-инновационная Стратегия развития экономики России. *Вестник российской академии наук*. 2014;84(10):867–873.

3. Бак П. Как работает природа. Теория самоорганизованной критичности. Москва: URSS; 2022. 288 с.

4. Малинецкий Г.Г. Чудо самоорганизованной критичности. В кн.: *Как работает природа. Теория самоорганизованной критичности*. Москва: URSS; 2022. С. 13–44.

5. Акимов В.А., Дедученко Ф.М., Дурнев Р.А., Рвачев А. Т., Арабский А. К., Кульчицкий А. Б. и др. Концепция создания единой системы комплексной техногенной безопасности и защищенности промыслов нефтегазового комплекса РФ. *Газовая промышленность*. 2015;(S4(732));70–83.

6. Дедученко Ф.М. Проект противодействия развитию катастроф на природно-техногенных объектах инфраструктуры России. *Надежность и безопасность энергетики*. 2021;14(3):111–117. https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-3-111-117

7. Cox L.A. What's wrong with risk matrices? *Risk analysis*. 2008;28(2):497–511. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x

8. Pickering A., Cowley S.P. Risk Matrices: implied accuracy and false assumptions. *Journal of Health & Safety Research & Practice*. 2010;2(1):11–18. URL: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7634511/-mod_resource/content/0/Risk%20matrices%20false%20assumptions.pdf (дата обращения: 02.10.2023).

9. Bychkov S., Rudnitska R., Maggs R., Kesteren M., Aramyan G., Németh E. et al. *Risk assessment in audit planning. A guide for auditors on how best to assess risks when planning audit work.* 2014. 46 p. URL: https://www.pempal.org/sites/pempal/files/event/attachments/cross_day-2_4_pempal-iacop-risk-assessment-in-audit-planning_eng.pdf.

10. Новожилов Е.О. Принцип построения матриц рисков. *Надежность*. 2015;3:73–86. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2015-0-3-73-86

11. Карманов А.В., Телюк А.С., Шершукова К.П. Реализация принципа ALARP при синтезе многоканальной системы противоаварийной защиты. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2014;(6):36–40.

12. Телюк А.С. *Синтез систем противоаварийной защиты для процессов подготовки продукции нефтегазовых скважин*. Автореф. дис. канд. тех. наук. Москва; 2014. 24 с. URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01007881385.pdf?ysclid=lpmoogd1bk891406616 (дата обращения: 02.10.2023)

13. Телюк А.С. Программное обеспечение автоматизированного синтеза систем противоаварийных защит. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2014;1:36–39.

14. Гапанович В.А., Шубинский И.Б., Замышляев А.М. Метод оценки рисков системы из разнотипных элементов. *Надежность*. 2016;(2):49–53. https://doi.org/10.21683/1729-2640-2016-16-2-49-53

References

1. Deduchenko FM. Tekhnologicheskie, ekologicheskie i organizatsionnye aspekty obespecheniya prirodno-tekhnogennoi bezopasnosti neftegazovoi otrasli Rossii. In: *Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala Zapadnoi Sibiri. Mat-ly XXV nauch.-prakt. konf.* Khanty-Mansiysk: V.I.Shpilman research and analytical centre for the rational use of the subsoil; 2022. P. 12–28. (In Russ.).

2. Dmitrievskii AN, Mastepanov AM, Bushuev VV. Resource-innovative strategy of Russia's economic development. *Herald of the Russian Academy of Sciences.* 2014;84(10):867–873. https://doi.org/10.7868/S0869587314100077 (In Russ.).

3. Bak P. *Kak rabotaet priroda. Teoriya samoorganizovannoi kritichnosti.* Moscow: URSS; 2022. 288 p. (In Russ.).

4. Malinetskii GG. Chudo samoorganizovannoi kritichnosti. In book: *Kak rabotaet priroda. Teoriya samoorganizovannoi kritichnosti.* Moscow: URSS; 2022. P. 13–44. (In Russ.).

5. Akimov VA, Deduchenko FM, Durnev RA, Rvachev AT, Arabskii AK, Kulchitskii AB, et al. Kontseptsiya sozdaniya edinoi sistemy kompleksnoi tekhnogennoi bezopasnosti i zashchishchennosti promyslov neftegazovogo kompleksa RF. *Gazovaya promyshlennost'.* 2015;(S4(732));70–83

6. Deduchenko FM. Project of counteracting catastrophic developments at nature-man-made objects in Russia. *Safety and Reliability of Power Industry.* 2021;14(3):111–117. https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-3-111-117 (In Russ.).

7. Cox LA. What's wrong with risk matrices? *Risk analysis*. 2008;28(2):497–511. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x

8. Pickering A, Cowley SP. Risk matrices: implied accuracy and false assumptions. *Journal of Health & Safety Research & Practice*. 2010;2(1):11–18. URL: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7634511/-mod_resource/content/0/Risk%20matrices%20false%20assumptions.pdf (accessed: 02.10.2023)

9. Bychkov S, Rudnitska R, Maggs R, Kesteren M, Aramyan G, Németh E, et al. *Risk assessment in audit planning. A guide for auditors on how best to assess risks when planning audit work.* 2014. 46 p. URL: https://www.pempal.org/sites/pempal/files/event/attachments/cross_day-2_4_pempal-iacop-risk-assessment-in-audit-planning_eng.pdf.

10. Novozhilov EO. Guidelines for construction of a risk matrix. *Dependability*. 2015;3:73–86. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2015-0-3-73-86 (In Russ.).

11. Karmanov AV, Telyuk AS, Shershukova KP. ALARP principal implementation while performing synthesis of milti-channel emergency protection system. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti.* 2014;6:36–40. (In Russ.).

12. Telyuk AS. *Sintez sistem protivoavariinoi zashchity dlya protsessov podgotovki produktsii neftegazovykh skvazhin.* Author's thesis. Moscow; 2014. 24 p. URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01007881385.pdf?ysclid=lpmoogd1bk891406616 (accessed: 02.10.2023) (In Russ.).

13. Telyuk AS. Programmnoe obespechenie avtomatizirovannogo sinteza sistem protivoavariinykh zashchit. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti*. 2014;1:36–39. (In Russ.).

14. Gapanovich VA, Shubinsky IB, Zamyshlyaev AM. Risk assessment of a system with diverse elements. *Dependability*. 2016;2:49–53. 2016;(2):49–53. https://doi.org/10.21683/1729-2640-2016-16-2-49-53 (In Russ.).

Поступила в редакцию 28.09.2023
Поступила после рецензирования 16.10.2023
Принята к публикации 20.10.2023

Об авторах:

Феликс Михайлович Дедученко, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, руководитель комплексной научно-технической программы института проблем нефти и газа Российской Академии наук (119333 г. Москва, ул. Губкина, 3), fmd11@mail.ru

Анатолий Николаевич Дмитриевский, академик РАН, научный руководитель института проблем нефти и газа РАН (119333 г. Москва, ул. Губкина, 3), director@ipng.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ф.М. Дедученко — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, расчеты, подготовка текста, формулирование выводов.

А.Н. Дмитриевский — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 28.09.2023
Revised 16.10.2023
Accepted 20.10.2023

About the Authors:

Feliks M. Deduchenko, Dr. Sci. (Physi.-Math.), Chief Researcher, Head of the Integrated Scientific and Technical Program, Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences (3, Gubkina Str., Moscow, 119333, RF), fmd11@mail.ru

Anatolii N. Dmitrievskii, Academician of the Russian Academy of Sciences, Science Director, Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences (3, Gubkina Str., Moscow, 119333, RF), director@ipng.ru

Claimed contributorship:

FM Deduchenko: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, calculations, preparation of the text, formulation of the conclusions;

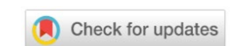
AN Dmitrievsky: academic advising, analysis of the research results, revision of the text, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 614.8.084 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-70-79

Разработка механизмов повышения культуры производственной безопасности по результатам анализа анкетирования работников

М.А. Суфиянова ✉, **А.Т. Волохина**, **Е.В. Глебова**
Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация
✉ sufiyanova.m@gubkin.ru

Аннотация
Введение. Обеспечение производственной безопасности (ПБ) является одной из приоритетных целей любой компании. Очевидно, что достижение ее высокого уровня невозможно без формирования культуры безопасности у работников, так как их неправильные действия могут повлечь создание аварийных ситуаций и гибель людей на опасных производственных объектах. Понятие культуры производственной безопасности (КПБ) трактуется по-разному, однако все определения объединяет необходимость осознания работниками того факта, что производственная безопасность должна стать их главной целью и внутренней потребностью. На сегодняшний день существует немало методик для определения степени развития КПБ. Они активно и успешно применяются на многих предприятиях. Вместе с тем следует отметить, что в российском законодательстве отсутствует, в частности, методика количественной оценки культуры производственной безопасности конкретно на предприятиях нефтегазового комплекса, имеющих свои особенности и специфику. Поэтому внедрение нового количественного подхода к оценке эффективности управления культурой производственной безопасности имеет важное научное и практическое значение в отраслевой повестке дня. Целью данной работы в связи с этим является разработка механизмов для повышения уровня КПБ на одном из газотранспортных предприятий страны, предпринятая по результатам анализа анкетирования его работников.
Материалы и методы. Для анализа использовались результаты трехуровневого анкетирования, проведенного в 2021 и в 2022 годах, которое включало в себя социально-биографические характеристики работников, их оценки по специально разработанным 16 компонентам производственной безопасности, а также интервьюирование фокус-групп на предмет шести выделенных компонентов ПБ.
Результаты исследования. В ходе проведенного анализа анкет было установлено повышение уровня культуры производственной безопасности с прогнозируемого (третьего уровня) до проактивного (четвертого уровня) согласно пятиуровневой классификации Международной ассоциации производителей нефти и газа (IOGP).
Обсуждение и заключение. Сравнительный анализ продемонстрировал положительную динамику результатов оценки уровня КПБ работниками газотранспортного предприятия. Повышение его на данном предприятии достигнуто благодаря внедрению и реализации проактивных мероприятий, таких как разработка личных обязательств работников в области безопасности, их максимальная вовлеченность в процесс развития компетенций в области производственной безопасности, обеспечение открытости/прозрачности коммуникаций по вопросам безопасности, формирование позитивного отношения работников к изменениям в этой сфере.

Ключевые слова: культура производственной безопасности, уровень зрелости, фокус-группы, анкетирование

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам газотранспортного предприятия за проявленный интерес к обсуждаемой теме и добросовестное прохождение анкетирования и интервьюирования, благодарят редакционную коллегию журнала и рецензента за профессиональный анализ и рекомендации для корректировки статьи.

Для цитирования. Суфиянова М.А., Волохина А.Т., Глебова Е.В. Разработка механизмов повышения культуры производственной безопасности по результатам анализа анкетирования работников. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(4):70–79. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-70-79

Original article

Development of Mechanisms for Industrial Safety Culture Improvement Based on Employee Survey Analysis Results

Milyausha A. Sufiyanova ✉, **Alla T. Volokhina**, **Elena V. Glebova**

Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russian Federation

✉ sufiyanova.m@gubkin.ru

Abstract

Introduction. Ensuring industrial safety (IS) is one of the priority goals of any company. It is obvious that achieving its high level is impossible without the formation of a safety culture among employees, since their wrong actions can lead to emergencies and death of people at hazardous production facilities. The concept of industrial safety culture (ISC) is interpreted in different ways, but all definitions are united by the need for employees to realize that industrial safety should become their main goal and internal need. To date, there are many methods for determining the degree of ISC development. They are actively and successfully used at many enterprises. At the same time, it should be noted that the Russian legislation lacks, in particular, a methodology for quantifying the industrial safety culture specifically at the enterprises of the oil and gas complex, which have their own characteristics and specifics. Therefore, the introduction of a new quantitative approach to assessing the effectiveness of management of industrial safety culture has important scientific and practical significance on the industry agenda. The aim of this work in this regard was to develop mechanisms to increase the ISC level at one of the gas transportation enterprises of the country based on the results of the survey of its employees.

Materials and Methods. For the analysis, the results of a three-level questionnaire conducted in 2021 and 2022 were used, which included socio-biographical characteristics of employees, their assessments on specially developed 16 components of industrial safety, as well as the interview of focus groups on six selected IS components.

Results. During the analysis of the questionnaires, an increase in the level of industrial safety culture was established from the predicted (third level) to the proactive (fourth level) according to the five-level classification of the International Association of Oil and Gas Producers (IOGP).

Discussion and Conclusions. The comparative analysis demonstrated positive dynamics of the results of the ISC level assessment by the employees of the gas transport enterprise. Its increase at this enterprise was achieved through the introduction and implementation of proactive measures, such as the development of personal obligations of employees in the field of safety, their maximum involvement in the development of competencies in the field of industrial safety, ensuring openness/transparency of communications on safety issues, and the formation of a positive attitude of employees to changes in this area.

Keywords: industrial safety culture, maturation level, focus groups, survey

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the employees of the gas transportation company for their interest in the topic under discussion and conscientious answers and interviews and thank the editorial board of the journal and the reviewer for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Sufiyanova MA, Volokhina AT, Glebova EV. Development of Mechanisms for Industrial Safety Culture Improvement Based on Employee Survey Analysis Results. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):70–79. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-70-79

Введение. В настоящее время развитие производственной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса базируется на риск-ориентированном подходе, в основе которого лежит интеграция методологии анализа и управления рисками с существующими системами менеджмента. Как показывает практика, внедрение указанного подхода приводит к формированию высокой культуры производственной безопасности в компаниях.

В рамках нового стандарта ГОСТ Р ИСО 45001-2020 «Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования и руководство по применению»[1] оценка эффективности экономической деятельности компании неразрывно связана с оценкой ее достижений в области производственной безопасности.

В числе значимых нововведений данного стандарта — требования лидерства и приверженности высшего руководства к достижению поставленных целей, а также привлечение работников к идентификации опасностей и рисков, разработке и управлению системой менеджмента. Действительно, грамотное формирование и реализация лидерства руководства в производственных условиях для подавляющего большинства компаний представляется крайне сложной задачей, лишь немногим предприятиям удается сформировать посредством внедрения лидерских практик высокую культуру производственной безопасности.

Культура производственной безопасности сегодня является одним из наиболее важных элементов системы управления охраной труда во всех компаниях [1–3]. Существует достаточное количество методологических подходов к определению степени развития КПБ [4, 5]. Хорошо известными моделями, которые часто встречаются в практике международных компаний, являются кривая Брэдли, модель М. Флеминга и модель П. Хадсона [6, 7]. Эти модели были разработаны на основе опыта ведущих компаний мира и представляют этапы развития системы управления охраной труда, что позволяет, проведя конкретный анализ, определить области культуры безопасности, которые необходимо совершенствовать [8–10]. Например, DuPont располагает более чем двумя миллионами анкет в своей базе данных, охватывающей широкий спектр отраслей в 45 странах и более 10 000 объектов, которые можно визуализировать и сравнивать с другими отраслевыми компаниями, чтобы оценить ключевые показатели их культуры безопасности [11–13].

Материалы и методы. На основе анализа указанных международных практик была разработана оригинальная методика оценки культуры производственной безопасности с использованием трехэтапного анкетирования (по трем анкетам) с последующей обработкой результатов по заданным критериям.

Анкета № 1 содержит 10 вопросов, включающих оценку социально-биографических характеристик работников. Предполагается, что они определенным образом влияют на осознание важности обеспечения безопасности, на понимание и выполнение требований производственных инструкций. Другая часть вопросов направлена на определение отношения работников к идее нулевого травматизма, готовности нести ответственность за свои действия в отношении безопасности на производстве.

В анкете № 2 предложены вопросы для оценки 16 отдельных компонентов КПБ, представленных на (рис. 1).

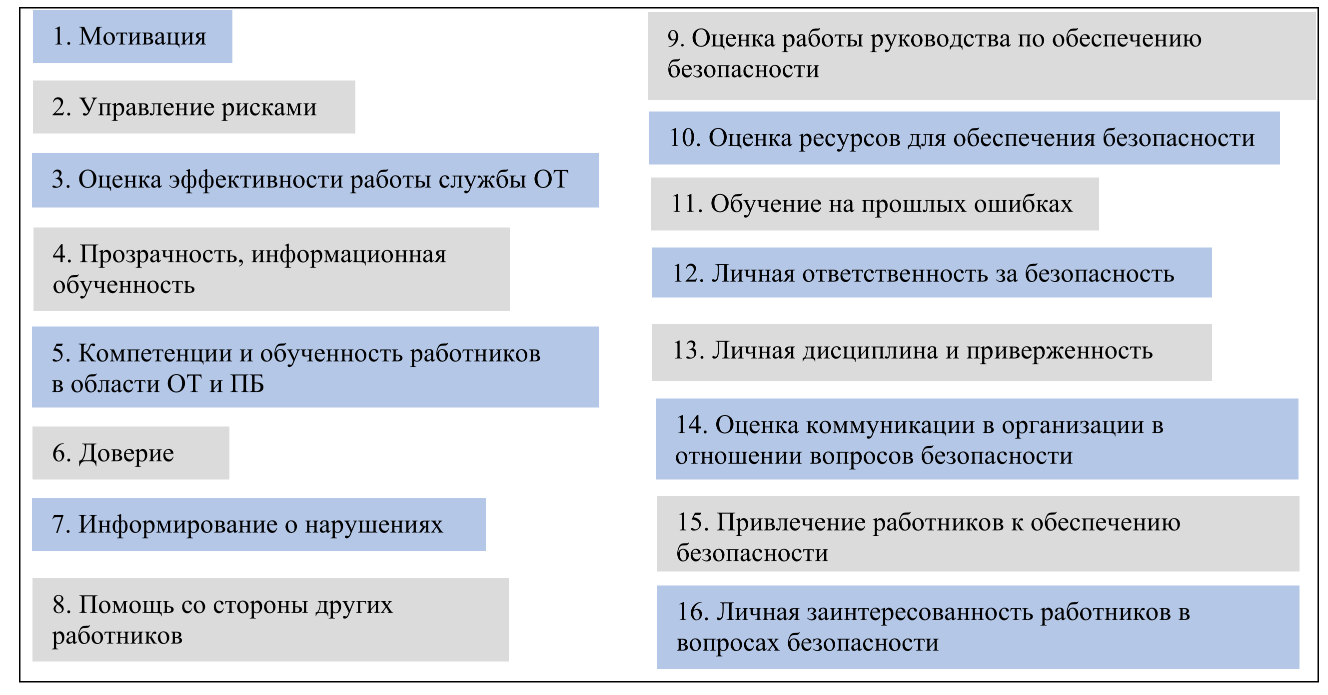


Рис. 1. Компоненты КПБ

[1]ГОСТ Р ИСО 45001-2020. *Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования и руководство по применению.* Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200175068 (дата обращения: 30.08.2023).

Для каждого из компонентов было составлено по четыре утверждения, два из которых положительные, а два — отрицательные. Работникам необходимо было выбрать степень согласия или несогласия с предлагаемыми утверждениями. Для дальнейшей обработки данных все ответы переводились в 5-балльную шкалу.

Для этапа интервьюирования фокус-группы была разработана оригинальная авторская анкета № 3, которая позволила дать оценку таким компонентам КПБ, как мотивация, компетенции и обученность работников в области ОТ и ПБ, оценка коммуникаций в вопросах безопасности, политика и общие ценности, оценка ресурсов для обеспечения безопасности и обучение на прошлых ошибках.

Интервьюирование о состоянии и уровне развития КПБ проводилось с работниками семи профессиональных категорий: руководители (администрация), специалисты (администрация), линейные руководители (производственные подразделения основного вида деятельности), линейные руководители (производственные подразделения вспомогательного вида деятельности), специалисты (производственные подразделения основного вида деятельности), специалисты (производственные подразделения вспомогательного вида деятельности), рабочие. Формат интервьюирования — очный (непосредственно аудитором на месте) и в режиме онлайн (посредством заполнения работниками специально разработанной электронной Яндекс.Формы). Все ответы, полученные в результате очного интервьюирования, в дальнейшем были также занесены в Яндекс.Формы. Предполагаемое время для прохождения интервьюирования/анкетирования — 30 минут.

По итогам заполнения Яндекс.Формы все ответы были переведены в баллы с последующим нахождением оценки работниками как отдельного компонента КПБ (средний балл по четырем утверждениям для данного компонента), так и в целом всех 16 компонентов (средний балл по 16 найденным компонентам) по шкале от 1 до 5.

Перевод средних значений оценки работниками КПБ на пятиуровневую классификацию Международной ассоциации производителей нефти и газа (IOGP) осуществлялся согласно шкале, указанной на рис. 2, где:

– 1 уровень — начальный. Понятие КПБ фактически отсутствует, все меры обеспечения носят случайный характер, требования не выполняются;

– 2 уровень — реактивный. Уровень КПБ не развит, но принимаются определенные меры обеспечения безопасности каждый раз после реализации неблагоприятного события;

– 3 уровень — прогнозируемый. Уровень КПБ начинает повышаться и постепенно стремится вверх благодаря созданию и внедрению формализованных подходов к управлению производственной безопасностью;

– 4 уровень — проактивный. Уровень КПБ достаточно высок, подтвержденные результатами ценности и лидерство обеспечивают постоянное улучшение производственной безопасности;

– 5 уровень — креативный. Система обеспечения производственной безопасности — это способ ведения бизнеса[2].

Результаты исследования. Результаты анкетирования работников, проведенного в 2021 и в 2022 годах, представлены в виде сравнительной гистограммы на рис. 3. Данные гистограммы демонстрируют положительную динамику результатов оценки КПБ работниками предприятия.

Компонентами КПБ, получившими наиболее высокие оценки как в 2021, так и в 2022 году, являются «Оценка эффективности службы ОТ и ПБ» (2021 г. — 3,86, 2022 г. — 4,33), «Личная ответственность за безопасность» (2021 г. —3,86, 2022 г. — 4,31), «Оценка работы руководства по обеспечению безопасности» (2021 г. — 3,79, 2022 г. — 4,26). Данные оценки относятся к проактивному уровню КПБ и означают, что на предприятии отсутствуют случаи сокрытия происшествий, у работников имеется возможность обратиться к руководству с вопросами по обеспечению безопасности, они осознают личную ответственность за нее и высоко оценивают работу службы ОТ и ПБ. При этом стоит обратить внимание на минимальные оценки: «Мотивация» (2021 г. — 3,41, 2022 г. — 4,15), «Оценка ресурсов для обеспечения безопасности» (2021 г. — 3,43, 2022 г. — 4,18). Минимальные оценки 2021 года относятся к прогнозируемому уровню КПБ, в то время как минимальные оценки 2022 года — к проактивному, и это несмотря на то, что компоненты демонстрируют наименьшее количество баллов в 2022 году. Эти данные говорят о большой проделанной работе с упором на эти компоненты.

[2] *IOGP Report 453 – Safety Leadership in Practice: A Guide for Managers* International Association of Oil & Gas Producers Bookstore (IOGP). URL: https://www.hpog.org/resource-centre/iogp-papers/new-download/ (дата обращения: 30.08.2023).



Рис. 2. Результаты анкетирования по международной пятиуровневой классификации производителей нефти и газа (IOGP) [13]

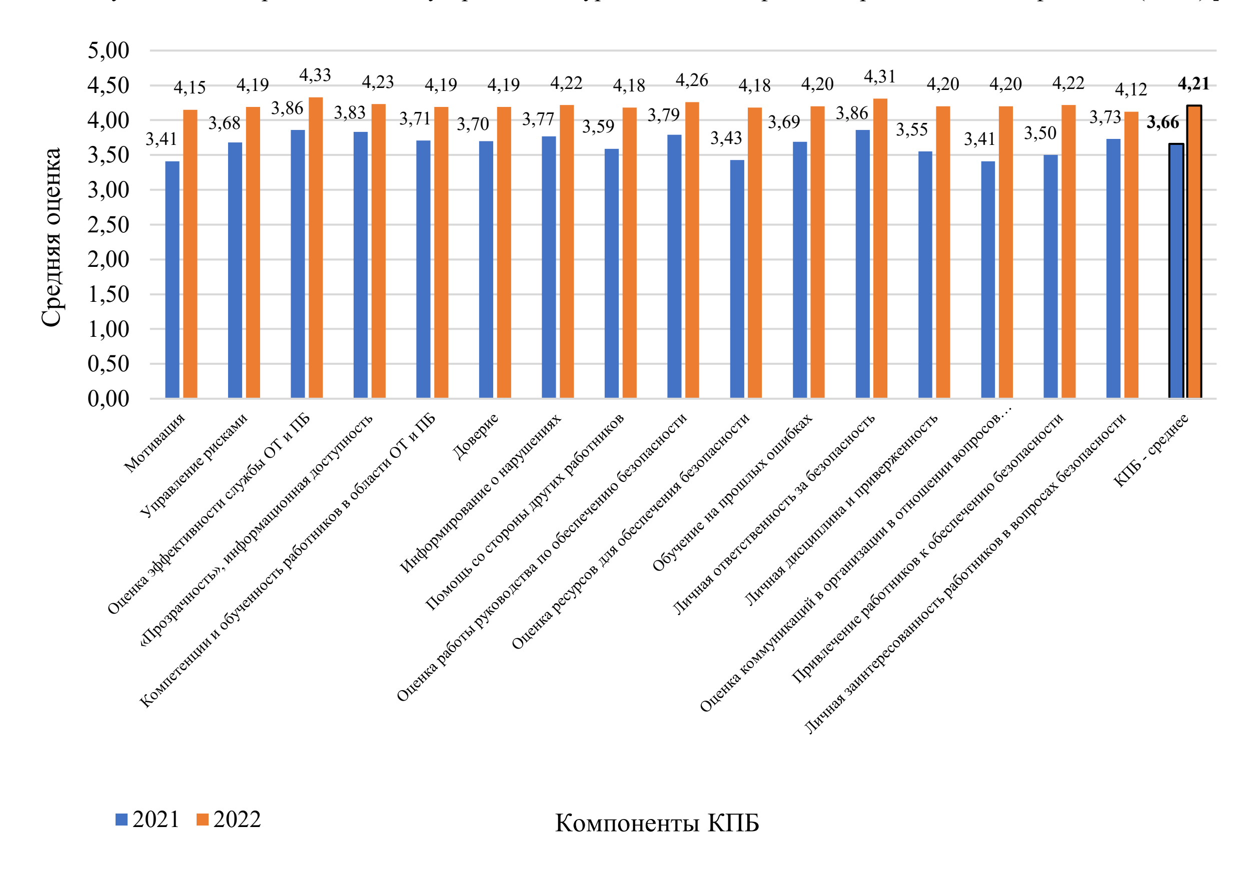


Рис. 3. Оценка уровня КПБ работниками газотранспортного предприятия в 2021 и 2022 гг.

Также были посчитаны средние оценки всех компонентов культуры производственной безопасности для каждой профессиональной категории и среднее значение КПБ по предприятию в целом. Сравнительная гистограмма представлена на рис. 4.

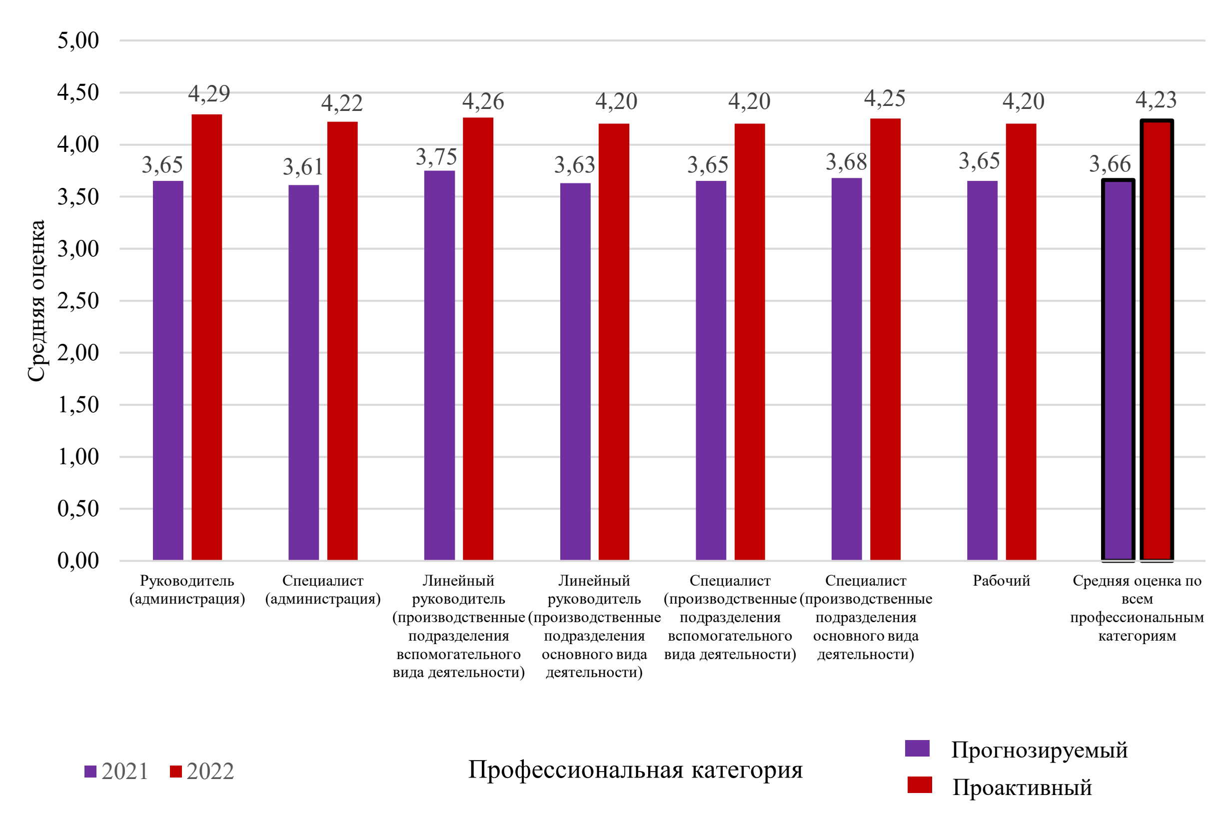


Рис. 4. Сравнение результатов средних оценок КПБ в зависимости от профессиональной категории работников газотранспортного предприятия за 2021 и 2022 гг.

Видно, что и в 2021 и в 2022 году профессиональная категория работников существенно не влияла на результаты оценки, но при этом было установлено повышение уровня КПБ до проактивного в каждой из профессиональных категорий. Это объясняется реализацией на данном предприятии таких проактивных мероприятий, как проведение смотра-конкурса состояния производственной безопасности и развития культуры безопасности с последующим поощрением победителей и выплатой денежного вознаграждения работникам, установка видеомониторов, на которых транслируются видеоролики нарушений и случаев травматизма, а также позитивные и значимые мероприятия, касающиеся вопросов ОТ и ПБ.

Согласно алгоритму оценки уровня КПБ по результатам анкетирования были построены гистограммы средних оценок всех работников по каждому компоненту культуры производственной безопасности для трех возрастных категорий: до 35 лет, от 36 до 49 лет, от 50 лет (рис. 5).

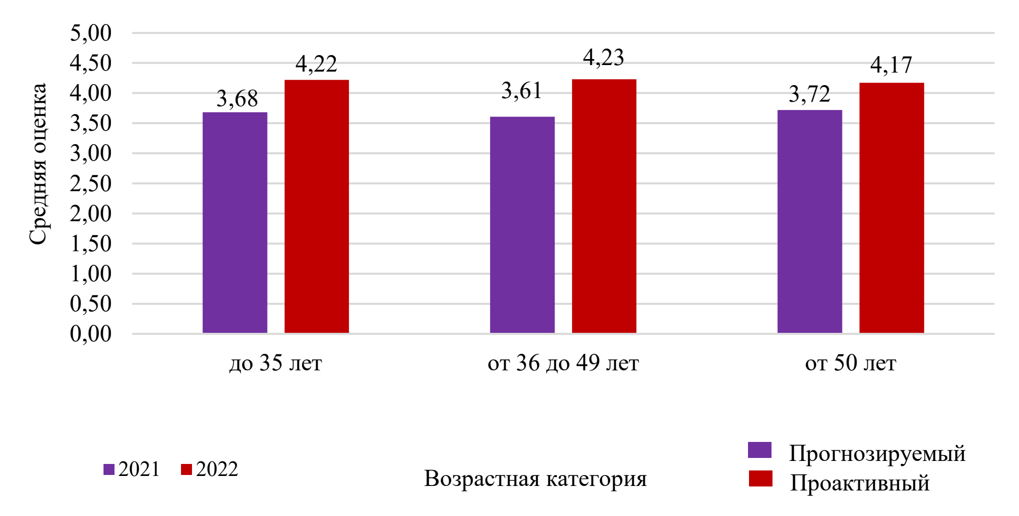


Рис. 5. Сравнение средних оценок уровня КПБ в зависимости от возрастной категории работников за 2021 и 2022 гг.

Как видно на рисунке, работники всех возрастных категорий отнесли уровень КПБ в 2022 году к проактивному, в то время как в 2021 году он был прогнозируемым. Однако представленные данные показывают отсутствие зависимости оценки уровня КПБ от возраста работников.

По результатам анкетирования для сравнительного анализа были сформированы две круговые диаграммы распределения всех анкетируемых по уровням КПБ (рис. 6).



а) *б)*

Рис. 6. Сравнение количества работников газотранспортного предприятия по уровням развития КПБ: *а* — за 2021 г., *б* — за 2022 г.

Таким образом, можно отметить, что исчез реактивный уровень (среднее значение лежит в пределах от 1,26 до 2,50). Важно подчеркнуть, что в 2021 году 58 % работников оценили уровень культуры производственной безопасности на прогнозируемом уровне (среднее значение лежит в пределах от 2,51 до 3,75), в то время как в 2022 году этот показатель составил лишь 8 %. Выросла доля работников, оценивших уровень зрелости КПБ на проактивном уровне — от 37 % до 79 % (среднее значение лежит в пределах от 3,76 до 4,50). Показательным результатом является рост процентного соотношения работников, оценивших уровень КПБ на креативном уровне — от 4 до 13 %.

По результатам интервьюирования фокус-группы (анкета № 3) было выявлено, что большинство опрошенных (70 %) знакомо с мотивационной программой за безопасный труд. Более того, по их мнению, данная программа эффективно функционирует. В то же время 70 % интервьюируемых респондентов не знают, какая доля премии выплачивается им за безопасный труд и отсутствие нарушений требований ОТ и ПБ. Однако подавляющее большинство работников (90 %) знает, какие виды взысканий по отношению к ним может применять руководитель за нарушение требований ОТ и ПБ. Вероятно, не все работники понимают, как функционирует программа мотивации на предприятии.

Большинство опрошенных из фокус-группы (95 %) считают, что работодатель обеспечивает достаточный объем обучения в области ОТ и ПБ, однако лишь четверть из них подчеркивают, что обучение проходит в интерактивном формате, с последующей практической проработкой изложенного материала.

Обсуждение и заключение. Проделанная авторами работа позволила прежде всего оценить уровень КПБ на исследуемом газотранспортном предприятии, а также представить сравнительный анализ среднего значения КПБ по всем компонентам. В 2022 году это значение составляло 4,23 (4-й уровень), тогда как средняя оценка в 2021 году — 3,66 (3-й уровень) согласно пятиуровневой классификации Международной ассоциации производителей нефти и газа.

Ежегодный мониторинг уровня КПБ позволил выделить более низкие компоненты, на которые нужно обратить внимание: мотивация и компетентность, обученность работников в области ОТ и ПБ. В связи с этим по предложению авторов статьи администрацией и службой ОТ и ПБ газотранспортного предприятия были проведены и внедрены мероприятия по совершенствованию уровня КПБ.

Для обеспечения мотивации на безопасный труд были предложены методы поощрения за выполнение и методы воздействия за нарушение ключевых правил газотранспортного предприятия, разработаны методические материалы для работы с персоналом, демонстрирующим рисковое поведение, а также доведены до работников посредством памяток и информационных плакатов сведения о премиальных выплатах. С целью формирования и развития компетенций в области производственной безопасности разработаны личные обязательства работников в области производственной безопасности, проведено и будет продолжаться обучение работников по программам повышения квалификации «Лидерство в области производственной безопасности», «Поведенческий аудит безопасности. Правила проведения», «Идентификация опасностей и управление рисками в области производственной безопасности», «Анализ коренных причин происшествий.

Порядок их установления и разработки мероприятий по предупреждению», а также по темам «ISO 45001:2018 «Системы менеджмента охраны здоровья и безопасности труда. Требования и руководство по применению», «Порядок проведения аудитов системы менеджмента охраны здоровья и безопасности труда с учетом требований стандарта ISO 45001:2018», организованы работы, направленные на развитие риск-ориентированного мышления у работников предприятия.

В дальнейшем планируется разработать и внедрить систему оценки персонала, которая позволит определить уровень развития критически важных личностных и лидерских качеств работников и тем самым оценить влияние этих качеств на обеспечение высокого уровня КПБ.

Список литературы

1. Аджиенко Г.В., Дайман С.Ю. Безопасность, основанная на доверии. *Информационный бюллетень. Чистые технологии и устойчивое развитие.* 2017;3(3):12–15. URL: https://lepel.vitebsk-region.gov.by/uploads/documents/Kontseptsija-nulevogo-travmatizma.pdf (дата обращения: 25.08.2023).

2. Глебова Е.В., Волохина А.Т., Суфиянова М.А., Вихров А.Е. Анализ результатов поведенческих аудитов безопасности на предприятиях ТЭК. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2021;3(300):15–18. https://doi.org/10.33285/2411-7013-2021-3(300)-15-18

3. Guldenmund FW. *Understanding and exploring safety culture*. The Netherlands, Delft University; 2010. 254 p. URL: https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:30fb9f1c-7daf-41dd-8a5c-b6e3acfe0023/?collection=research (дата обращения: 25.08.2023).

4. Большов Л.А., Арутюнян Р.В., Линге И.И., Абалкина И.Л. Ядерные аварии: последствия для человека, общества и энергетики. *Радиационная гигиена*. 2016;9(3):43–52. https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-3-43-52

5. Скачок В.Е., Кожекина И.Ю., Петровская Л.Ю., Котлярович А.А., Проурзина О.Ю. Место безопасности в жизни человека и общества и её вес в системе потребностей. *Молодой ученый*. 2018;17(203):266–268. URL: https://moluch.ru/archive/203/49645/ (дата обращения: 25.08.2023).

6. Маслоу А. *Мотивация и личность*. 3-е изд. Санкт-Петербург: Питер; 2019. 400 с.

7. Reason J. Safety paradoxes and safety culture. *Injury Control and Safety Promotion.* 2010;7(1):3–14. https://doi.org/10.1076/1566-0974(200003)7:1;1-V;FT003

8. Sari Tappura, Aki Jääskeläinen, Julius Pirhonen. Designing a safety culture maturity model. *Occupational and Environmental Safety and Health IV.* 2022;449:55–56. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12547-8_5

9. Dominic Cooper M. The safety culture construct: theory and practice. *Safety Cultures, Safety Models*. 2018;224:47–61. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95129-4_5

10. Sutton I.S. Use root cause analysis to understand and improve process safety culture. *Process Safaty Progress.* 2010;27(4):274–279. https://doi.org/10.1002/prs.10271

11. Beus J.M., Payne S.C., Bergman M.E., Arthur W.Jr. Safety climate and injuries: an examination of theoretical and empirical relationships. *Journal of Applied Psychology.* 2010;95(4):713–727. https://doi.org/10.1037/a0019164

12. Nirupama Gopalaswami, Zhe Han. Analysis of laboratory incident database. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2020;64:104027. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.104027

13. Sutton I. Culture and participation. *Process Risk and Reliability Management.* Second edition. Gulf Professional Publishing; 2015. P. 139–178. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801653-4.00003-5

References

1. Adzhienko GV, Daiman SYu. Bezopasnost', Osnovannaya na Doverii. *Informatsionnyi byulleten'. Chistye tekhnologii i ustoichivoe razvitie.* 2017; 3(3):12–15. URL: https://lepel.vitebsk-region.gov.by/uploads/documents/Kontseptsija-nulevogo-travmatizma.pdf (accessed: 25.08.2023). (In Russ.).

2. Glebova EV, Volokhina AT, Sufiyanova MA, Vikhrov AE. Analysis of the Results of the Conducted Behavioral Safety Audits at the Enterprises of the Fuel and Energy Complex (FEC). *Environmental protection in oil and gas complex.* 2021;3(300):15–18. https://doi.org/10.33285/2411-7013-2021-3(300)-15-18 (accessed: 25.08.2023). (In Russ.).

3. Guldenmund FW. *Understanding and exploring safety culture*. The Netherlands, Delft University; 2010. 254 p. URL: https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:30fb9f1c-7daf-41dd-8a5c-b6e3acfe0023/?collection=research (accessed: 25.08.2023).

4. Bolshov LA, Arutyunyan RV, Linge II, Abalkina IL. Nuclear accidents: consequences for human, society and energy sector. *Radiatsionnaya Gygiena*. 2016;9(3):43–52. URL: https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-3-43-52 (accessed: 25.08.2023). (In Russ.).

5. Skachok VE, Kozhekina IYu, Petrovskaya LYu, Kotlyarovich AA, Prourzina OYu. Mesto bezopasnosti v zhizni cheloveka i obshchestva i ee ves v sisteme potrebnostei. *Molodoi uchenyi*. 2018;17(203):266–268. URL: https://moluch.ru/archive/203/49645/ (accessed: 25.08.2023). (In Russ.).

6. Maslou A. *Motivatsiya i lichnost'*. 3-d ed. Saint-Petersburg: Piter; 2019. 400 p. (In Russ.).

7. Reason J. Safety paradoxes and safety culture. *Injury Control and Safety Promotion.* 2010;7(1):3–14. https://doi.org/10.1076/1566-0974(200003)7:1;1-V;FT003

8. Sari Tappura, Aki Jääskeläinen, Julius Pirhonen. Designing a safety culture maturity model. *Occupational and Environmental Safety and Health IV.* 2022;449:55–56. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12547-8_5

9. Dominic Cooper M. The safety culture construct: Theory and practice. *Safety Cultures, Safety Models*. 2018;224:47–61. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95129-4_5

10. Sutton IS. Use root cause analysis to understand and improve process safety culture. *Process Safaty Progress.* 2010;27(4):274–279. https://doi.org/10.1002/prs.10271

11. Beus JM, Payne SC, Bergman ME, Arthur WJr. Safety climate and injuries: an examination of theoretical and empirical relationships. *Journal of Applied Psychology.* 2010;95(4):713–727. https://doi.org/10.1037/a0019164

12. Nirupama Gopalaswami, Zhe Han. Analysis of laboratory incident database. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2020;64:104027. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.104027

13. Sutton I. Culture and participation. *Process Risk and Reliability Management*. Second edition. Gulf Professional Publishing; 2015. P. 139–178. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801653-4.00003-5

Поступила в редакцию 02.09.2023
Поступила после рецензирования 25.09.2023
Принята к публикации 30.09.2023

Об авторах:

Миляуша Айнуровна Суфиянова, магистрант кафедры промышленной безопасности и охран окружающей среды Российского государственного университета нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (119991, г. Москва, проспект Ленинский, 65/1), ORCID, sufiyanova.m@gubkin.ru

Алла Тагировна Волохина, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры промышленной безопасности и охраны окружающей среды Российского государственного университета нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (119991, г. Москва, проспект Ленинский, 65/1), ScopusID, AuthorID, ORCID, alla_volohina@mail.ru

Елена Витальевна Глебова, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой промышленной безопасности и охраны окружающей среды Российского государственного университета нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (119991, г. Москва, проспект Ленинский, 65/1), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID, elena.glebova50@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Авторы внесли равноценный вклад в постановку задачи и определение цели исследования, проведение экспериментов и расчетов, формулирование выводов и корректировку текста статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 02.09.2023
Revised 25.09.2023
Accepted 30.09.2023

About the Authors:

Milyausha A. Sufiyanova, Master's Degree Student of the Industrial Safety and Environmental Protection Department, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (65/1, Leninsky Ave., Moscow, 119991, RF), ORCID, sufiyanova.m@gubkin.ru

Alla T. Volokhina, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Industrial Safety and Environmental Protection Department, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (65/1, Leninsky Ave., Moscow, 119991, RF), ScopusID, AuthorID, ORCID, alla_volohina@mail.ru

Elena V. Glebova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Industrial Safety and Environmental Protection Department, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (65/1, Leninsky Ave., Moscow, 119991, RF), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID, elena.glebova50@mail.ru

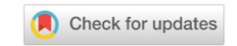
Claimed contributorship: the authors have made an equal contribution to the formulation of the task and the definition of the aim of the study, conducting experiments and calculations, drawing conclusions and correcting the text of the article

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MACHINE BUILDING





УДК 628.465.9

https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-80-96

Научная статья

Модель многопараметрической оптимизации характеристик канатной дороги в системе транспортировки твердых бытовых отходов

Ю.В. Марченко, **В.В. Дерюшев**, **С.И. Попов**, **Э.В. Марченко**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ marchenko-6470@mail.ru

Аннотация

Введение. Современная научная и прикладная литература довольно обстоятельно рассматривает проблемы функционирования канатных дорог. В первую очередь речь идет о вопросах обеспечения надежности и безопасности движения — как во время эксплуатации, так и в процессе разработки проекта.

Кроме того, рассматривается взаимосвязь канатных дорог с окружающей средой, выясняется уровень экологической нагрузки от данного вида транспорта. Хорошим решением могло бы стать использование математических моделей, способных учитывать комплекс параметров и критериев, характеризующих канатную дорогу как систему. Этот же подход был бы полезен для оптимизации технических характеристик объекта. Однако в литературе не представлено описание такого решения. Данный пробел отчасти восполняет представленная работа. Ее цель — создание модели многопараметрической оптимизации технических характеристик канатной дороги для транспортировки твердых бытовых отходов (ТБО).

Материалы и методы. Для уточнения теоретической базы изучена литература, в целом описывающая проблемы канатных дорог и их решения. Математические расчеты обоснованы объемной подборкой уравнений, доказавших адекватность при определении полезной транспортной работы, нагрузки, корректировки времени и скорости перемещения грузов и других значимых параметров исследуемой системы. При формировании модели исходили из принципов Л.С. Понтрягина (игольчатая вариация) и Гамильтона — Остроградского (кинематика определенного отрезка дороги). Текстовые данные об особенностях элементов системы и их взаимодействии сведены в таблицы. Итоги главных расчетов визуализированы в виде графиков.

Результаты исследования. Представлено решение задачи оптимального управления канатной дорогой, по которой перемещают ТБО. Вектор управления движением показан как вектор оптимизируемых технических параметров системы: скорость движения, натяжение каната, число и вес контейнеров. Воспроизводится известное решение задачи оптимизации в общем виде, которое предполагает определение вектор-функции управления и соответствующей ему траектории с достижением минимума целевого функционала. Отмечено слабое место системы дифференциальных уравнений для реализации целей данной научной работы. В этой связи предложено рассматривать исследуемый участок канатной дороги как динамическую систему с распределенными параметрами. Детально описана постановка задачи многокритериальной оптимизации. Перечислены преимущества сокращения количества учитываемых критериев и обосновано применение метода редукции, который базируется на иерархической структуризации системы частных критериев оптимальности. Рассмотрены во взаимосвязи четыре главных элемента системы транспортировки твердых бытовых отходов (ТБО). Это канатная дорога, транспортно-логистический пункт, транспортно-логистический терминал и среда, которая генерирует ТБО. В рамках данной работы речь идет об урбанизированной среде. Перечислены подэлементы названных элементов и показаны 12 направлений их взаимодействий. Детально, в рамках трехуровневой иерархии, описаны четыре главных комплексных показателя сложности изучаемой системы: среда, дорога, пункт и терминал. Показано решение многокритериальной задачи оптимизации, выполнены расчеты по оптимизируем параметрам — характеристика сложности дороги и характеристика местности. Результаты расчетов представлены в виде графиков. Таким образом проиллюстрированы зависимости оптимизируемых параметров от массы загруженного контейнера, длины и скорости канатной дороги.

Обсуждение и заключение. Основной итог исследования — сформировано представление о возможности математического решения многопараметрической и многокритериальной задачи оптимизации двух характеристик канатной дороги (сложность и особенность местности). Предложенный подход позволяет менять иерархию в комплексе показателей. Результаты данной научной работы можно использовать при необходимости интеграции проекта дороги с нейросетевыми моделями, в работе с нечеткими лингвистическими показателями, для решения прикладных задач.

Ключевые слова: сложность канатной дороги, сложность среды канатной дороги, транспортировка твердых бытовых отходов, многокритериальная оптимизация

Благодарности. Авторы выражают признательность коллегам за помощь.

Для цитирования. Марченко Ю.В., Дерюшев В.В., Попов С.И., Марченко Э.В. Модель многопараметрической оптимизации характеристик канатной дороги в системе транспортировки твердых бытовых отходов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(4):80–96. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-80-96

Original article

Model of Multi-Parameter Optimization of Cable Car Characteristics in a Solid Waste Transportation System

Yulianna V. Marchenko, Viktor V. Deryushev, Sergey I. Popov, Edward V. Marchenko
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ marchenko-6470@mail.ru

Abstract
Introduction. Modern scientific and applied literature examines the problems of cable cars functioning quite thoroughly. First of all, it concerns ensuring the reliability and safety of traffic, both during operation and during project development.
In addition, the paper considers the relationship of cable cars with the environment and the level of environmental load from this type of transport. A good solution could be the use of mathematical models that can take into account a set of parameters and criteria that characterize the cable car as a system. The same approach would be useful for optimizing technical characteristics of the object. However, there is no description of such a solution in the literature. This gap is partially filled by the presented work. The study aims to create a model of multivariable optimization of cable car technical characteristics for the transportation of municipal solid waste (MSW).
Material and Methods. To clarify the theoretical basis, the literature describing the problems of cable cars and their solutions in general has been studied. Mathematical calculations were justified by a volume of equations that proved their adequacy in determining the useful transport work, load, adjustment of time and speed of cargo movement and other significant parameters of the system under study. When forming the model, we proceeded from the principles of L.S. Pontryagin (needle variation) and Hamilton — Ostrogradsky (kinematics of a certain road segment). Text data about the features of the system elements and their interaction were summarized in tables. The main calculations results were visualized in the form of graphs.
Results. The solution to the problem of optimal control of the cable car on which solid waste was moved was presented. The motion control vector was shown as a vector of optimized technical parameters of the system: speed of movement, rope tension, number and weight of containers. The well-known solution to the optimization problem was reproduced in a general form, which involved determination of a control vector function and its corresponding trajectory with the achievement of a minimum of the target functional. The weak point of the system of differential equations for the realization of the goals of this scientific work was noted. In this regard, it was proposed to consider the investigated section of the cable car as a dynamic system with distributed parameters. The formulation of the multi-criteria optimization problem was described in detail. The advantages of reducing the number of criteria taken into account were listed and the use of the reduction method, which was based on the hierarchical structuring of the system of partial optimality criteria, was justified. Four main elements of the municipal solid waste (MSW) transportation system were considered in interrelation. This was a cable car, a transport and logistics point, a transport and logistics terminal and an environment that generated solid waste. Within the framework of this work, we considered an urbanized environment. The sub-elements of the named elements were listed and 12 directions of their interactions were shown. In detail, within the framework of a three-level hierarchy, four main complex indicators of the complexity of the system under study were described: environment, road, point and terminal. The solution of a multi-criteria optimization problem was

shown, calculations were performed for the optimized parameters — the characteristic of the complexity of the road and the characteristic of the terrain. The results of calculations were presented in the form of graphs. Thus, the dependences of the optimized parameters on the weight of the loaded container, the length and speed of the cable car were illustrated. ***Conclusions.*** The main result of the study is an idea of the possibility of a mathematical solution of a multivariable and multi-criteria problem of optimizing two characteristics of a cable car (complexity and terrain feature). The proposed approach allows you to change the hierarchy in the complex of indicators. The results of this scientific work can be used, if necessary, to integrate the road project with neural network models, to work with fuzzy linguistic indicators, to solve applied problems.

Keywords: cable car complexity, cable car environment complexity, transportation of municipal solid waste, multi-criteria optimization

Acknowledgements: the authors would like to thank their colleagues for their help.

For citation. Marchenko YuV, Deryushev VV, Popov SI, Marchenko EV. Model of Multi-Parameter Optimization of Cable Car Characteristics in a Solid Waste Transportation System. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):80–96. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-80-96

Введение. Современные канатные дороги представляют собой высокотехнологичные комплексы для перемещения пассажиров и грузов. Им посвящены многочисленные научные и прикладные исследования. Изучаются технические особенности этих объектов. Уточняются вопросы их взаимосвязи с окружающей средой. Следуя трендам последних лет, авторы выясняют уровень экологической нагрузки от данного вида транспорта. В фокусе внимания неизменно остается обеспечение надежности и безопасности движения — как во время эксплуатации, так и в процессе разработки проекта.

Многие авторы и коллективы изучали вопросы улучшения технических характеристик канатных дорог за счет усовершенствования их конструкций. Результаты таких исследований реализованы в проектах пассажирского и грузового канатного транспорта [1–3]. В работах [4, 5] представлен иной подход к проблеме надежности и безопасности эксплуатации рассматриваемых объектов. В данном случае качество проекта обусловлено количеством факторов, которые влияют на устойчивость системы. В этой связи целесообразно было бы рассмотреть возможности многопараметрической и многокритериальной оптимизации технических характеристик канатных дорог. Однако в современной научной литературе нет публикаций на эту тему.

Цель представленной работы — показать возможность создания модели многопараметрической оптимизации технических характеристик канатной дороги для транспортировки твердых бытовых отходов (ТБО).

Материалы и методы. В рамках представленной научной работы обобщены данные литературы, посвященной изучаемому вопросу. Один из подходов к решению проблемы описан в [6]. ТБО собирают в съемные контейнеры, уплотняют, помещают в вакуум и грузовым автотранспортом доставляют в транспортно-логистический пункт. Здесь контейнер перемещают на грузовую канатную дорогу. Она соединяет транспортно-логистический пункт с транспортно-логистическим терминалом, где контейнер перегружают на промежуточный замедляющий конвейер, снимают с канатной дороги, разгружают, затем моют и обеззараживают. Описанная схема предполагает экологический контроль процессов, а также техобслуживание и ремонт.

Рассмотрим участок канатной дороги между двумя опорами (рис. 1). Предположим, что опоры расположены на одинаковой высоте и на расстоянии l друг от друга. Между ними может находится один или несколько контейнеров весом $G_{кi}$ ($i = 1, \ldots, n$) каждый.

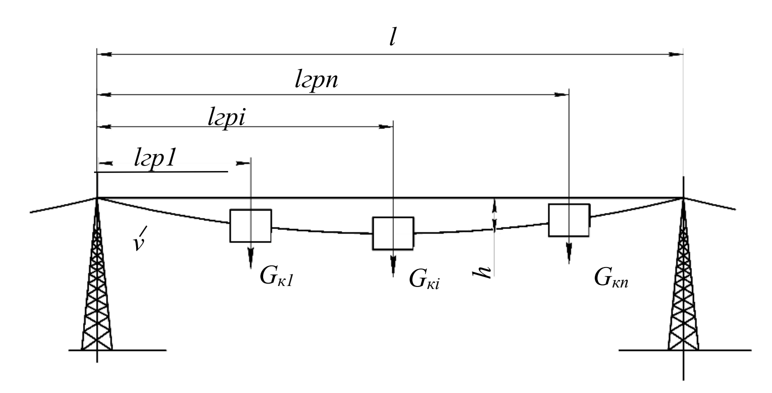


Рис. 1. Схема процесса транспортирования контейнеров на канатной дороге

На выделенном участке канатной дороги контейнеры с грузом общим весом $G_{гр} = \sum_{i=1}^{n} G_{кi}$ доставляются на определенное расстояние, и при этом совершается полезная транспортная работа A, равная произведению количества груза в тоннах на расстояние $l_{гр}$ в км:

$$A = G_{гр} \cdot l_{гр} = \sum\nolimits_{(i=1)}^{n} (G_{кi} \cdot l_{грi}).$$

Транспортная работа измеряется в тонно-километрах. Производительность транспортного процесса — это полезная транспортная работа в единицу времени:

$$W = \frac{G_{гр} l_{гр}}{t}$$

где t — время, затраченное на перемещение груза общим весом $G_{гр}$ на расстояние суммарного груза от опоры $l_{гр}$; $l_{гр} = \sum\nolimits_{(i=1)}^{n} l_{грi} / n$.

Величина $v = l_{гр} / t$ представляет собой скорость перемещения грузов по канатной дороге. В первом приближении ее можно считать равной скорости движения каната. В общем случае, учитывая провисание каната с контейнерами на величину h, скорость перемещения грузов по канатной дороге будет несколько меньше скорости движения каната.

Эффективный процесс — это доставка как можно большего количества грузов за меньшее время на заданное расстояние. В нашем случае грузы заданным общим весом $\sum G_{гр}$ перемещаются по канатной дороге на расстояние l между двумя опорами. Тогда задача повышения эффективности сводится к минимизации времени перемещения $t_{гр}$:

$$t_{гр} = \frac{\sum G_{гр} l}{v \sum_{i=1}^{n} G_{кi}} \to \min.$$

При решении задач по сокращению времени транспортировки варьируются такие характеристики канатной дороги, как скорость движения v, натяжение каната T, количество контейнеров между опорами n и вес одного контейнера с грузом $G_{кi}$. Значение $G_{кi}$ принимаем одинаковым для всех контейнеров. Тогда задача повышения эффективности сводится к максимизации:

$$v \sum_{(i=1)}^{n} G_{кi} \to \max. \qquad (1)$$

Скорость движения грузовых подвесных канатных дорог ограничивается нормативами в области промышленной безопасности[1]. Параметр скорости обычно ограничивается коэффициентом динамичности μ:

$$\mu = \frac{A_д}{A_{ст}},$$

где $A_д$ — амплитуда колебаний контейнера, зависящая от скорости движения каната; $A_{ст}$ — статическая (или равновесная) амплитуда, т. е. статическая деформация упругой связи (максимальное провисание каната) под действием сил веса всех контейнеров при нулевой или очень низкой скорости движения каната.

Изменение формы и частоты колебаний [7] приводит к изменению динамических нагрузок на канаты и другие силовые элементы. Перегрузка, действующая на контейнер в вертикальном направлении по оси z:

$$\beta = \frac{P_д}{P_{ст}} = 1 + \frac{\ddot{z}}{g},$$

где $P_д$ — динамическая нагрузка, $P_{ст}$ — статическая нагрузка, $\ddot{z}$ — ускорение контейнера в направлении вертикальной оси z.

Итак, будем исходить из требований безопасности. Учтем влияние натяжения каната и параметров из выражения (1) на коэффициент динамичности и величину перегрузок. В таком случае решение задачи повышения эффективности требует решения оптимизационной задачи динамики канатной системы, которая описывается конечным множеством параметров. Таким образом, речь идет о многопараметрической задаче.

Результаты исследования

[1]*Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности пассажирских канатных дорог и фуникулеров».* Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 441 от 13 ноября 2020 г. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/573191373 (дата обращения 25.09.2023).

Постановка задачи оптимизации для систем с сосредоточенными и распределенными параметрами. Для реализации поставленной задачи применим игольчатую вариацию Л.С. Понтрягина [8] к инвариантным признакам действительного движения динамической системы.

В классической постановке задачи оптимального управления канатная дорога между опорами рассматривается как голономная динамическая система, механические связи которой сводятся к геометрическим. Для рассматриваемой системы справедлив принцип Гамильтона — Остроградского [9], в соответствии с которым на траектории $q(t)$, не содержащей кинематических фокусов:

$$\delta J = \int_0^{t_k} (\delta T + \delta' A)\, dt = 0\,, \tag{2}$$

$$t = 0,\ q(0) = q_0,\ t = t_k,\ q(t_k) = q_k,$$
$$\delta q_0 = \delta q_k = 0\,, \tag{3}$$

где J — целевой функционал; $T = T(q,\ \dot{q})$ — кинетическая энергия; $A = \int_{q(0)}^{q(t_k)} Q dq$ — работа обобщенных сил, которые зависят от обобщенных координат; $q(t) = [q_1, \ldots, q_n]^T \in R^n$ — вектор задаваемых обобщенных координат; $Q(t) = [Q_1, \ldots, Q_n]^T \in R^n$ — вектор обобщенных сил; $t = [0, t_k]$ — время; δ — символ варьирования; δ' — символ бесконечно малого приращения величин.

Вектор обобщенных сил зависит от вектора управления $u(t)$:

$$u(t) \in R^m,\ \ Q = Q(q, \dot{q}, u, t),\ m \le n. \tag{4}$$

Вектор управления движением — это вектор оптимизируемых технических параметров системы: скорость движения, натяжение каната, число и вес контейнеров.

В общем виде задача оптимизации предполагает определение вектор-функции управления $u(q,\dot{q})$ и соответствующей траектории $q(t)$, чтобы достигался минимум целевого функционала:

$$J = \int_0^{t_k} F\left(q,\dot{q}\right) dt \to min. \tag{5}$$

При условии (2), (3) и ограничениях на управление:

$$u \in \overline{G_u}, \tag{6}$$

где $\overline{G}_u$ — замкнутое множество допустимых управлений в пространстве задаваемых на конечном интервале времени $[0, t_k]$ функций; $F(q,\dot{q})$ — знакопостоянная функция.

Допустим, в первом приближении канатная система моделируется как динамическая и состоит из конечного числа сосредоточенных масс (контейнеров), соединенных между собой упругими связями. В этом случае для решения задачи оптимизации нужно определить законы изменения скорости движения $v(t) = \dot{x}(t)$, натяжения каната $T = f(t)$, значения числа контейнеров $n(x, \dot{x})$ и их веса G_{ki} — такие, чтобы целевой функционал J принимал минимальное значение:

$$J = \int_0^{t_k} \left[\left(x - x_k\right)^2 + \varepsilon \left(\dot{x} - \dot{x}_k \right)^2 \right] dt \to min\,. \tag{7}$$

Начальные и терминальные условия для (7):

$$t = 0,\ x\left(0\right) = 0,\ \dot{x}(0) = v_{\min};\ t = t_k,\ x\left(t_k\right) = l, \dot{x}(t_k) = v_{\max}. \tag{8}$$

Кроме того, учитывая (2), будем иметь в виду обыкновенные дифференциальные уравнения движения рассматриваемой динамической системы. На скорость движения, величину натяжения, количество и вес контейнеров накладываются ограничения:

$$v_{\min} \le v \le v_{\max};\ 0 < T \le T_{\max};\ 1 < n \le n_{\max};\ G_{\min} < G_{ki} \le G_{\max}. \tag{9}$$

К тому же ограничиваются ускорения контейнеров в направлении оси x, в поперечном направлении (по оси z), а также поперечные отклонения i-го контейнера $w(x_i,t)$ по оси z:

$$\ddot{x}_i(t) \le \ddot{x}_{\max};\ \ddot{z}_t(t) \le \ddot{z}_{\max};\ w(x_i, t) \le w_{\max}. \tag{10}$$

Для решения задачи оптимизации вместо целевого функционала (7) рассматривается расширенный функционал:

$$J = \int_0^{t_k} \left\{ \frac{1}{2} x^2 + \mu \left[\frac{\dot{x}^2}{2} + \int_{x_0}^{x} u\, dx \right] \right\} dt\,, \tag{11}$$

где μ — множитель Лагранжа.

Отметим слабое место построения системы обыкновенных дифференциальных уравнений движения рассматриваемой динамической системы с переменным числом сосредоточенных масс и изменяемыми

граничными условиями. Дело в том, что для реализации такого подхода необходимо ввести ряд допущений, которые снижают достоверность результатов оптимизации. Поэтому соответствующий участок канатной дороги рассмотрим как динамическую систему с распределенными параметрами. В этом случае для исследования динамических процессов системы с подвижной дискретной и распределенной инерционной нагрузкой используем приведенное в однородное дифференциальное уравнение поперечных колебаний каната в частных производных:

$$\rho(x)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}+2\rho(x)v\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial t}-(T-\rho(x)v^2)\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}=0, \qquad (12)$$

где $\rho(x)=\rho_0+\sum_{i=1}^{n}G_{грi}\delta(x-x_i)$; ρ_0 — масса единицы длины каната; $G_{грi}$ — масса i-го сосредоточенного груза; $\delta(x-x_i)$ — функция Дирака; x_i — координата, определяющая положение i-го груза; T — натяжение каната; $w(x,t)$ — поперечное отклонение; v — продольная скорость движения каната.

Подробный обзор методов решения задач оптимизации для динамических систем с распределенными параметрами, в том числе для гиперболических систем вида (10) с управляемыми связями на границах, приведен в работе [9]. Большинство методов строятся на предположении, что из всех допустимых управляющих воздействий на рассматриваемую систему лишь одно соответствует оптимальному состоянию процесса, т. е. решению дифференциального уравнения (10). Еще одно предположение — выпуклость множества допустимых управлений в целевом функционале — например, как в (7). В то же время для систем с распределенными параметрами допустимо отсутствие оптимального управления или наличие многомодальных функций в целевом функционале при многопараметрической оптимизации. К тому же сложность получения необходимых (и, желательно, достаточных) условий оптимальности не гарантирует адекватности результатов решения модельной оптимизационной задачи целям оптимизации для реального объекта. Указанный недостаток характерен и для динамических систем, моделируемых обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Сказанное выше доказывает актуальность разработки подходов, которые позволят преодолеть отмеченные выше недостатки. Речь идет о методах так называемого субоптимального управления. К таковым относятся методы многокритериальной оптимизации, используемые в задачах принятия решений или задачах выбора. В данном случае они дают возможность рассматривать одновременно большее число параметров оптимизируемой системы в многомерном пространстве критериев (показателей).

Постановка задачи многокритериальной оптимизации. Пусть U — n-мерный вектор оптимизируемых технических параметров системы (вектор управления) и $n > 1$. В нашем случае $n = 4$. Компоненты вектора: u_1 — скорость движения, u_2 — натяжение каната, u_3 — число контейнеров, u_4 — вес одного контейнера. На вектор U, как отмечалось выше, могут быть наложены ограничения, составляющее замкнутое множество $\overline{G_u}$ вида (6), которое называется множеством допустимых значений вектора оптимизируемых параметров. Размерность этого множества $r \geq n$. Ограничения и ограничивающие функции имеют вид (9) и (10).

Введем в m-мерном арифметическом пространстве (критериальном пространстве) R_e^m векторный критерий оптимальности $K(U)$, определенный на множестве $\overline{G_u}$. Здесь $m \geq 1$, т. е. в предельном случае при $m = 1$ задача оптимизации становится однокритериальной, при $m > 1$ — многокритериальной. Компоненты векторного критерия оптимальности — частные критерии оптимальности:

$$K(U) = \{k_1(U), k_2(U), \ldots, k_m(U)\}. \qquad (13)$$

На них также могут быть наложены ограничения. Это связано с необходимостью приведения к безразмерному виду и единой шкале изменения значений, например, в предлагаемой модели:

$$0 \leq k_i(U) \leq 1,\ i = [1,\ldots, m]. \qquad (14)$$

Кроме того, в общем случае при формировании частных критериев оптимальности в зависимости от цели оптимизации значения одних частных критериев нужно повышать, а значения других уменьшать. Учтем, однако, что задача минимизации критерия путем введения обратного преобразования сводится к задаче максимизации. Поэтому допустим, что в разрабатываемой модели желательна максимизация всех частных критериев оптимальности.

Отметим также возможные ограничения по значению m, т. е. по количеству частных критериев оптимальности (показателей), формируемых при решении конкретных задач. Очевидно, что один критерий, даже комплексный, не может охватить все требования. Современные компьютерные технологии позволяют решать задачи с большим объемом данных без потери точности, поэтому многие исследователи максимально увеличивают количество частных критериев, задействуют даже те факторы, которые практически не влияют на

результат оптимизации. При этом увеличение размерности системы затрудняет построение и может нарушить устойчивость вычислительных алгоритмов, особенно в целевых функционалах с многомодальными функциями.

С математической точки зрения сокращение количества критериев снижает сложность вычислительных алгоритмов и открывает возможность простой графической интерпретации результатов (например, для двумерных или трехмерных критериальных пространств). К тому же упрощается проверка алгоритмов. Задачу можно свести к однокритериальной, а для ее решения есть много проверенных методов. В целом уменьшение размерности (редукция) формируемой системы частных критериев оптимальности (показателей) значительно упрощает решение задачи оптимизации.

Чаще всего для редукции используют метод исключения дублирующих друг друга или малозначимых показателей. Однако при этом можно ошибочно исключить важные факторы. Поэтому в рамках представленной работы задействовали метод редукции, основанный на иерархической структуризации системы частных критериев оптимальности без их искусственного исключения [10].

Итак, рассмотрим функции (процессы) рассматриваемой системы с оптимизируемым объектом — канатной дорогой (рис. 2).

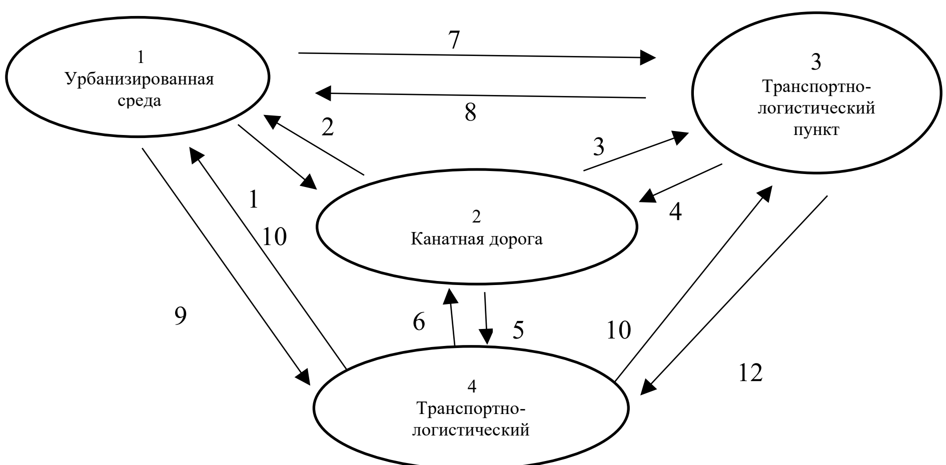


Рис. 2. Функциональная схема системы транспортирования ТБО

В [6] описаны четыре элемента системы транспортирования ТБО.

1. Урбанизированная среда определяет:

– планировку населенных пунктов;

– транспортную инфраструктуру;

– рельеф и ландшафт местности;

– природно-климатические условия;

– вес и объем образующихся ТБО;

– время вывоза ТБО.

2. Канатная дорога выполняет основную функцию — перемещение ТБО к месту утилизации. Основные (в том числе оптимизируемые) характеристики этого элемента системы:

– тип канатной дороги;

– число контейнеров на дороге и между опорами;

– натяжение каната;

– диаметр каната;

– скорость движения;

– шаг дискретных приводов;

– шаг опор.

3. В транспортно-логистическом пункте собираются и какое-то время хранятся ТБО. Основные характеристики:

– площадь;

– высота крытых помещений;

– производительность погрузочно-разгрузочных работ;

– размеры и технические возможности конвейеров;

– количество пустых контейнеров.

4. В транспортно-логистическом терминале ТБО разгружают, перемещают с канатной дороги к месту утилизации. Опустошенные контейнеры направляют на мойку, хранение и дефектацию. Основные характеристики данного элемента системы:

– площадь;

– высота крытых помещений;

– размеры и технические возможности конвейеров;

– производительность погрузочно-разгрузочных работ;

– параметры оборудования для мойки, сушки и дезинфекции пустых контейнеров;

– количество пустых контейнеров.

В таблице 1 описательно представлены взаимодействия элементов, которые показаны на рис. 2 цифрами от 1 до 12.

Таблица 1

Взаимодействие элементов системы транспортирования ТБО по канатной дороге

№	Направление	Взаимодействующие элементы
1	Урбанизированная среда — канатная дорога	Объем и вес ТБО; объем, вес, количество контейнеров; технические характеристики дороги
2	Канатная дорога — урбанизированная среда	Процессы эксплуатации канатной дороги; экологическое состояние среды; показатели безопасности пересекаемых объектов (дороги, водные преграды, строения, сельскохозяйственные угодья и др.)
3	Канатная дорога — транспортно-логистический пункт	Количество и вес пустых контейнеров; скорость и регулярность поступления контейнеров в пункт
4	Транспортно-логистический пункт — канатная дорога	Количество и вес загруженных контейнеров; скорость и регулярность поступления контейнеров на канатную дорогу
5	Канатная дорога — транспортно-логистический терминал	Количество и вес загруженных контейнеров; скорость и регулярность поступления контейнеров в терминал
6	Транспортно-логистический терминал — канатная дорога	Количество и вес пустых контейнеров; скорость и регулярность поступления контейнеров на канатную дорогу
7	Урбанизированная среда — транспортно-логистический пункт	Длина маршрута; транспортная инфраструктура; объем и вес контейнера; грузоподъемность автомобиля; количество автомобилей и контейнеров на автомобиле; скорость автомобиля; скорость и регулярность поступления контейнеров в транспортно-логистический пункт; климатические условия
8	Транспортно-логистический пункт — урбанизированная среда	Процессы эксплуатации транспортно-логистического пункта; экологическая обстановка
9	Урбанизированная среда — транспортно-логистический терминал	Объем и вес ТБО; природно-климатические условия
10	Транспортно-логистический терминал — урбанизированная среда	Процессы эксплуатации транспортно-логистического терминала; экологическая обстановка
11	Транспортно-логистический терминал — транспортно-логистический пункт	Объем и вес ТБО; количество пустых, исключенных и добавленных контейнеров; процессы технического обслуживания и ремонта
12	Транспортно-логистический пункт — транспортно-логистический терминал	Объем, вес ТБО; количество заполненных, исключенных и добавленных контейнеров

На рис. 3 представлено в виде схемы взаимодействие основных параметров рассматриваемой системы для условного района Ростова-на-Дону.

Урбанизированная среда

Масса и объем твердых бытовых отходов: общий и при сортировке

Грузоподъемность машины

Планировка местности

Погодные условия

Время, затраченное на вывоз

Количество грузовиков

Число контейнеров на грузовике

Длина маршрута

Скорость автомобиля

Объем, вес контейнера

Количество контейнеров и скорость их поступления в транспортно-логистический пункт

Транспортно-логистический пункт

Скорость движения контейнера по конвейеру

Количество контейнеров на конвейере

Скорость погрузочно-разгрузочных работ

Количество контейнеров и скорость их поступления на канатную дорогу

Канатная дорога

Натяжение каната

Число контейнеров на дороге

Шаг дискретных приводов и опор

Скорость движения канатной дороги

Характеристика местности (рельеф, перепады высот, естественные препятствия)

Количество контейнеров и скорость их поступления в транспортно-логистический терминал

Транспортно-логистический терминал

Скорость выгрузки контейнера

Скорость движения контейнера по конвейеру

Скорость мойки контейнера

Скорость технического обслуживания контейнера

Количество контейнеров и скорость их возврата на канатную дорогу

Рис. 3. Схема функционального взаимодействия основных показателей системы транспортировки ТБО из условного района Ростова-на-Дону

Рис. 2 и 3 позволяют построить иерархию показателей (рис. 4).

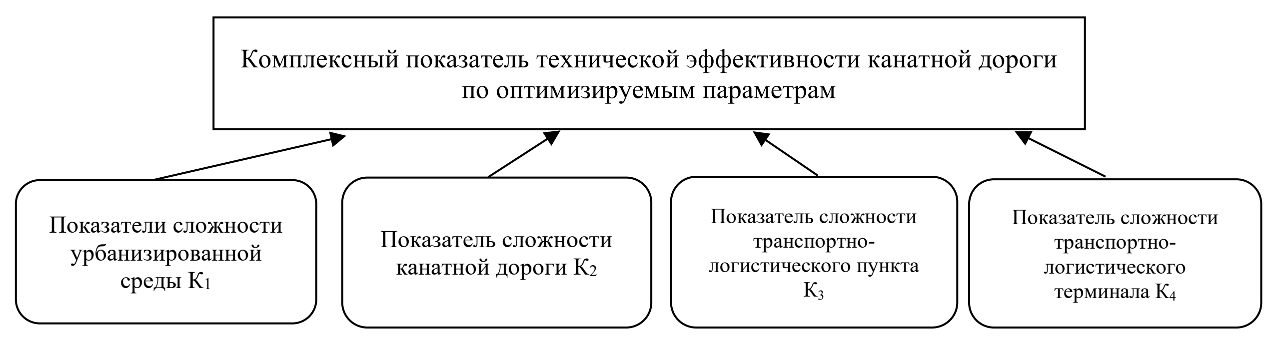


Рис. 4. Иерархическая структура критериев, характеризующих канатную дорогу как систему

Примеры комплексных показателей технической сложности построения и функционирования экологичной системы вывоза твердых бытовых отходов грузовым канатным транспортом в урбанизированной среде показаны в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Комплексные показатели технической сложности канатной дороги как системы транспортировки ТБО

Уровень показателя			Размерность, единица измерения
1-й	2-й	3-й	
Сложность урбанизированной среды К$_{1}$	Планировка населенного пункта с транспортной инфраструктурой К$_{11}$	Планировка местности К$_{111}$	Очень плохо
			Плохо
			Средне
			Хорошо
			Очень хорошо
		Состояние транспортной инфраструктуры К$_{112}$	Длина улиц с твердым покрытием к общей длине улиц
	Рельеф и ландшафт местности К$_{12}$		Плохо
			Средне
			Хорошо
	Характеристика твердых бытовых отходов (сут) К$_{13}$	Масса К$_{131}$	т
		Объем ТБО К$_{132}$	м^{3}
		Структура К$_{133}$	Твердые
			Жидкие
			Без классификации
	Природно-климатические условия К$_{14}$	Температура К$_{141}$	С^{0}
		Скорость ветра К$_{142}$	м/с
		Влажность воздуха К$_{143}$	%
		Число солнечных дней летом К$_{144}$	Единиц
	Вывоз твердых бытовых отходов К$_{15}$	Частота вывоза ТБО К$_{151}$	Раз в неделю
		Количество грузовиков К$_{152}$	Единиц
		Транспортные расходы (горюче-смазочные материалы, техобслуживание) К$_{153}$	Руб.
		Количество контейнеров на автомобиле К$_{154}$	Единиц
		Длина маршрута К$_{155}$	км
		Скорость автомобиля К$_{156}$	км/час
		Объем контейнера К$_{157}$	м^{3}
		Масса контейнера К$_{158}$	кг
Сложность канатной дороги К$_{2}$	Характеристики канатной дороги К$_{21}$	Длина канатной дороги К$_{211}$	м
		Число контейнеров на канатной дороге и между опорами К$_{212}^{*}$	Единиц
		Натяжение каната К$_{213}^{*}$	кН
		Скорость движения канатной дороги К$_{214}^{*}$	м/с
		Шаг опор К$_{215}$	м
		Диаметр каната К$_{216}^{*}$	мм
		Масса загруженных контейнеров К$_{217}$	кг
	Характеристики местности К$_{22}$	Перепад высот К$_{221}$	м
		Препятствия по пути движения К$_{222}$	Плохо
			Средне
			Хорошо

Уровень показателя			Размерность, единица измерения
1-й	2-й	3-й	
Сложность транспортно-логистического пункта К$_{3}$	Планировка транспортно-логистического пункта К$_{31}$	Занимаемая площадь К$_{311}$	м^{2}
		Высота крытых помещений К$_{312}$	м
	Характеристики погрузочно-разгрузочных работ К$_{32}$	Количество разгрузочных площадок К$_{321}$	Единиц
		Количество погрузочных площадок К$_{322}$	Единиц
		Производительность разгрузки К$_{323}$	Единиц /час
		Производительность погрузки К$_{324}$	Единиц /час
	Характеристики конвейера для пустых контейнеров К$_{33}$	Длина конвейера К$_{331}$	м
		Количество размещаемых контейнеров К$_{332}$	Единиц
		Количество пустых контейнеров, отправленных на хранение К$_{333}$	Единиц
	Характеристики разгоняющего конвейера К$_{34}$	Скорость конвейера К$_{341}$	м/с
		Длина конвейера К$_{342}$	м
		Грузоподъемность К$_{343}$	т
		Мощность привода К$_{344}$	кВт
	Характеристики замедляющего конвейера К$_{35}$	Скорость конвейера К$_{351}$	м/с
		Длина конвейера К$_{352}$	м
		Грузоподъемность К$_{353}$	т
		Мощность привода К$_{354}$	кВт
Сложность транспортно-логистического терминала К$_{4}$	Размер терминала К$_{41}$	Занимаемая площадь К$_{411}$	м^{2}
		Высота крытых помещений К$_{412}$	м
	Характеристики замедляющего конвейера К$_{42}$	Скорость конвейера К$_{351}$	м/с
		Длина конвейера К$_{352}$	м
		Грузоподъемность К$_{353}$	т
		Мощность привода К$_{354}$	кВт
	Параметры оборудования для выгрузки ТБО из контейнера К$_{43}$	Производительность К$_{431}$	Единиц / час
		Количество кантователей К$_{432}$	Единиц
		Количество площадок для разгрузки К$_{433}$	Единиц
	Параметры оборудования для мойки, сушки и дезинфекции пустых контейнеров К$_{44}$	Длина линии К$_{441}$	м
		Количество позиций мойки К$_{442}$	Единиц
		Давление воды К$_{443}$	МПа
		Характеристика моющих средств К$_{444}$	Плохо
			Средне
			Хорошо
		Скорость сушки К$_{445}$	мин
	Характеристики конвейера для техобслуживания и ремонта пустых контейнеров К$_{45}$	Длина конвейера К$_{451}$	м
		Количество размещаемых контейнеров К$_{452}$	Штук
		Количество пустых контейнеров, отправленных на техническое обслуживание и ремонт К$_{453}$	Штук
		Обслуживание контейнеров К$_{454}$	Плохо
			Средне
			Хорошо
	Характеристики разгоняющего конвейера К$_{46}$	Скорость конвейера К$_{461}$	м/с
		Длина конвейера К$_{462}$	м
		Грузоподъемность К$_{463}$	т
		Мощность привода К$_{464}$	кВт
К* — оптимизируемые параметры.			

Таблица 3

Интервалы изменений показателей сложности канатной дороги

Показатель 3-го уровня	Единица измерения, размерность	Интервал изменения
Длина канатной дороги K_{211}	м	1000…50000
Число контейнеров на канатной дороге и между опорами K_{212}^{*}	Единиц	1…20
Натяжение каната K_{213}^{*}	кН	10…15
Скорость движения канатной дороги K_{214}^{*}	м/с	0,5…5
Шаг опор K_{215}	м	40…150
Диаметр каната K_{216}^{*}	мм	10…1000
Масса загруженных контейнеров K_{217}	кг	500…1500
Перепад высот K_{221}	м	0…2000
Препятствия по пути движения K_{222}	Плохо	0…1
	Средне	
	Хорошо	

В общем случае на каждом уровне иерархии должно быть не менее двух показателей (за исключением самого верхнего, который представляет собой целевую функцию). При группировке частных критериев на каждом уровне количество критериев (показателей) в группе может меняться от одного до некоторого заданного максимального значения, т. е. $1 \le m \le m_{\max}$. При $m = 1$ показатель верхнего уровня без изменения переходит на нижний и наоборот. Максимальное значение определяется размерностью критериального пространства и сложностью построения вычислительной процедуры оптимизации в этом пространстве. Примем $m_{\max} = 8$.

Все критерии (показатели) нижнего уровня могут быть измеряемыми и неизмеримыми. Примеры для первого случая: «перепад высот», «общая длина». Для второго — «рельеф» (простой, сложный, очень сложный). Для описания таких критериев предлагается использовать методы теории нечетких множеств, т. е. определять функцию принадлежности объекта к соответствующему множеству, как в [10].

Итак, сформулируем задачу многокритериальной оптимизации на максимум для каждой группы частных критериев оптимальности на всех уровнях. Нужно определить вектор-функцию оптимизируемых параметров системы (вектор управления) U на замкнутом множестве $\overline{G_u}$, чтобы достигался максимум целевого функционала

$$K(U) \to \max \tag{15}$$

при условии (13) и ограничениях (9, 10 и 14).

$\overline{G_u}$ — замкнутое множество допустимых управлений в пространстве задаваемых функций (допустимых значений вектора оптимизируемых параметров).

Вектор $U^* \in \overline{G_u}$ называется глобальным решением задачи (15), если $K(U^*) \ge K(U)$ при всех $U \in \overline{G_u}$.

Для решения многокритериальной задачи оптимизации воспользуемся методом скаляризации векторного критерия (13). С этой целью применим аддитивную функцию:

$$K_c(U) = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i k_i(U). \tag{16}$$

Для коэффициентов α_i должны выполняться условия:

$$\alpha_i \ge 0 \text{ при } i = 1,...,m; \ \sum_{i=1}^{m} \alpha_i = 1. \tag{17}$$

Тогда исходная задача (15) сводится к поиску максимума интегрального показателя (16). В данном случае особенно важна методика определения коэффициентов α_i. Это коэффициенты свертки векторного критерия (13) из многокритериального пространства на числовую ось скалярного критерия (16) с физическим смыслом «лучше» — «хуже».

Для расчета коэффициентов свертки можно использовать методику, предложенную в [10]. В этом случае рассматриваются нечеткие отношения на парах объектов из обучающей выборки и интегрального скалярного показателя (16). Строится вычислительная процедура для функционала, определяющего величину невязки.

После определения векторов коэффициентов свертки для всех критериев иерархии нужно найти вектор-функцию оптимизируемых параметров системы (вектора управления) U, когда аддитивная функция (16)

достигает максимума для критерия верхнего уровня иерархии (целевая функция). При этом на множестве параметров целевая функция может иметь несколько локальных максимумов. Среди них нужно найти глобальный. Для решения таких задач есть несколько вычислительных методов [11]. Определенными преимуществами обладают так называемые эволюционные методы. Некоторые из них реализуются на базе специализированной мультидисциплинарной платформы ModeFrontier. Для решения поставленной задачи предлагаем генетический алгоритм [12].

Расчеты. Оптимизируемые параметры канатной дороги, как показано в таблице 2, входят в показатель K_2:

$$K_2 = 0,6K_{21} + 0,4K_{22}.$$

K_{21} (характеристика сложности канатной дороги) определяется по формуле:

$$K_{21} = 0,1K_{211} + 0,15K_{212} + 0,15K_{213} + 0,25K_{214} + 0,1K_{215} + 0,1K_{216} + 0,15K_{217}.$$

K_{22} (характеристика местности), определяется по формуле:

$$K_{22} = 0,5K_{221} + 0,5K_{222}.$$

Использование прикладных программных продуктов позволило показать результаты расчетов в виде графических зависимостей K_{21} и K_2 от оптимизируемых параметров на рис. 5–8. При этом численные значения изменяемых параметров определялись по данным табл. 2.

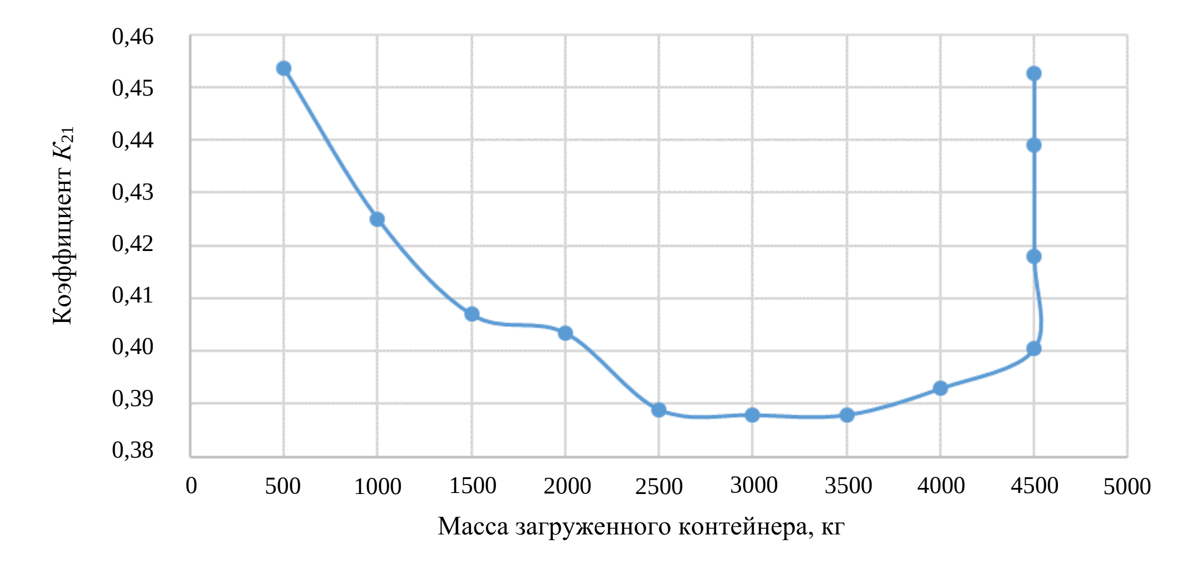


Рис. 5. Зависимость коэффициента K_{21} от массы загруженного контейнера при длине канатной дороги 20 тыс. м

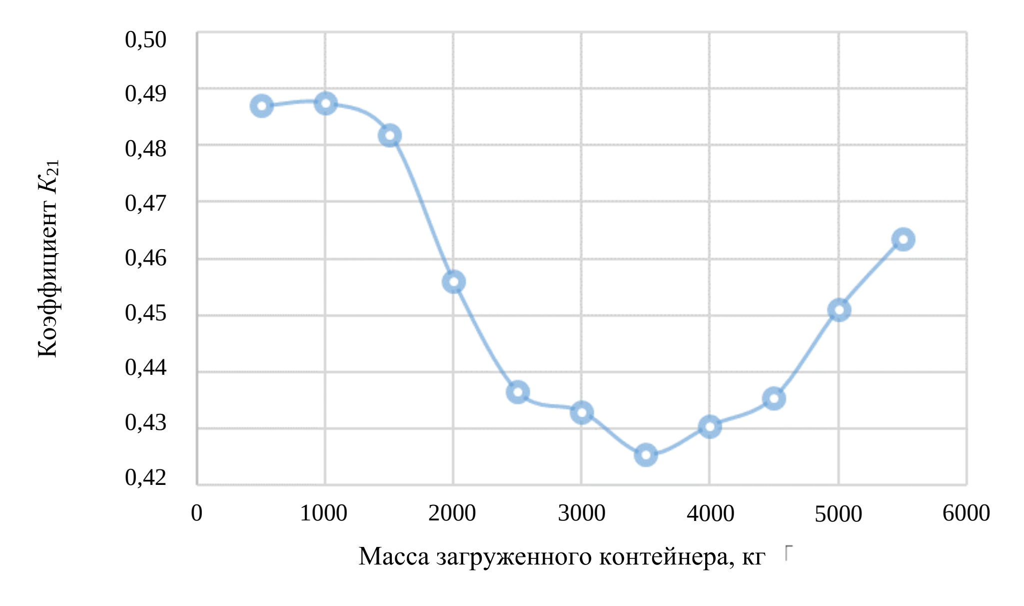


Рис. 6. Зависимость коэффициента K_{21} от массы загруженного контейнера при длине канатной дороги 40 тыс. м

Рис. 5 и 6 демонстрируют выраженный экстремум для показателя K_{21} (характеристика сложности канатной дороги) в диапазоне массы загруженного контейнера 2500…4500 кг. Это можно объяснить тем, что при использовании контейнеров с малой массой необходимо увеличить их количество для обеспечения заданной производительности. Как следствие растет число элементов системы, то есть она усложняется. Использование контейнеров с большой массой требует введения в систему таких элементов, как дополнительные дискретные приводы, системы гашения вибраций, увеличение толщины каната и др., что также усложняет систему.

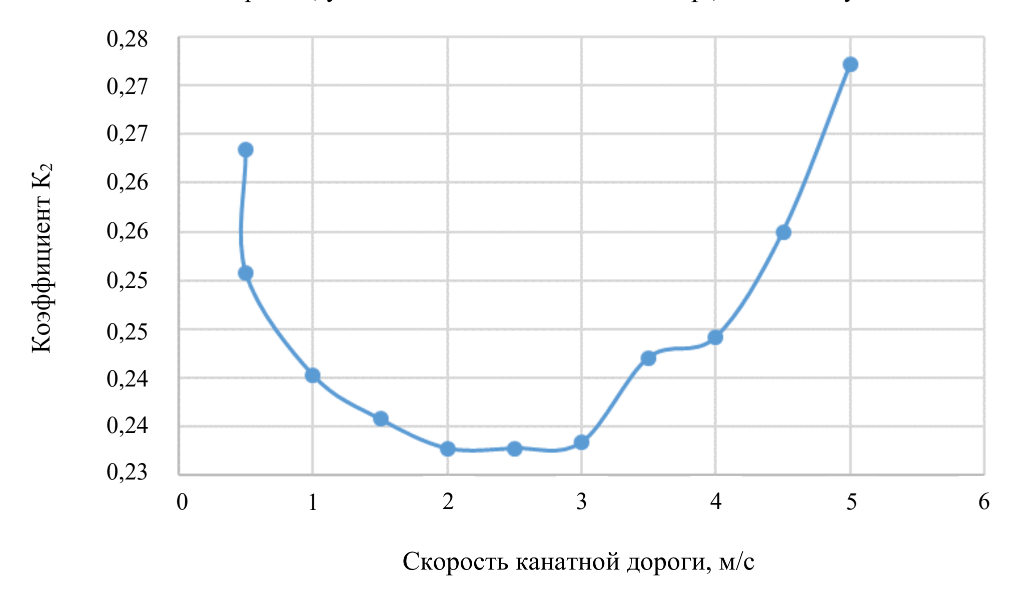


Рис. 7. Зависимость коэффициента K_2 от скорости канатной дороги длиной 20 тыс. м



Рис. 8. Зависимость коэффициента K_2 от скорости канатной длиной 40 тыс. м

Рис. 7 и 8 показывают, что в диапазоне скоростей канатной дороги 1,5–3,5 м/с показатель K_2 имеет наименьшие значения сложности, так как на низких скоростях требуется большее количество контейнеров, а на высоких необходимы дополнительные устройства для стабилизации движения.

Обсуждение и заключение. Итак, в качестве оптимизируемых параметров канатной дороги рассмотрены ее сложность и особенности местности. В первом случае для оптимизации нужно учитывать длину дороги, количество контейнеров, массу загруженных контейнеров, натяжение и диаметр каната, скорость движения канатной дороги и шаг опор. Во втором случае расчет базируется на данных о перепаде высот и возможных препятствиях по пути движения. Обе группы этих параметров демонстрируют сложность канатной дороги с точки зрения технологии и среды (показатель 1-го уровня K_2).

Предложена модель решения многопараметрической и многокритериальной задачи оптимизации характеристик канатной дороги. Она позволяет менять иерархию показателей. Данный подход можно

использовать при необходимости интеграции проекта с нейросетевыми моделями, в работе с нечеткими лингвистическими показателями, для решения прикладных задач.

Список литературы

1. Короткий А.А., Лагерев А.В., Месхи Б.Ч., Лагерев И.А., Панфилов А.В. *Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро*. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2017. 344 с. URL: http://ntb.donstu.ru/content/razvitie-transportnoy-infrastruktury-krupnyh-gorodov-i-territoriy-na-osnove-tehnologii-kanatnogo-metro (дата обращения: 25.08.2023).

2. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Оптимизация шага установки промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро. *Вестник Брянского государственного университета*. 2014;4:22–30. URL: http://vestnik-brgu.ru/wp-content/numbers/v2014_4.pdf (дата обращения: 09.08.2023).

3. Korotky A.A., Marchenko E.V., Popov S.I., Marchenko Ju.V., Dontsov N.S. Theoretical foundations of modeling the process of transport vehicles steel ropes structural defects formation. In: *E3S Web of Conferences*. 2020;175:05018. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505018

4. Кинжибалов А.В. *Повышение безопасности пассажирских канатных дорог на основе оценки риска и резервирования привода*. Автореф. дис. канд. тех. наук. Новочеркасск; Южно-Российский государственный технический университет: 2008. 24 с. URL: https://viewer.rusneb.ru/ru/000199_000009_003457469?page=1&rotate=0&theme=white (дата обращения: 09.08.2023).

5. Korotky A.A., Marchenko E.V., Ivanov V.V., Popov S.I., Marchenko Ju.V., Dontsov N.S. Model of forming vibration mechanochemical solid lubrication coating on surface of steel rope. In: *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2019;403:012116. https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012116

6. Marchenko Ju.V., Korotky A.A., Popov S.I., Marchenko E.V., Galchenko G.A., Kosenko V.V. Municipal waste management in an urbanized environment based on ropeway technology. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022;246:235–241. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_26

7. Анисимов В.Н., Литвинов В.Л. Поперечные колебания каната, движущегося в продольном направлении. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2017;19(4):161–166. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/poperechnye-kolebaniya-kanata-dvizhuschegosya-v-prodolnom-napravlenii/viewer (дата обращения: 09.08.2023).

8. Костоглотов А.А., Дерюшев В.В., Костоглотов А.И. Идентификация параметров динамических систем на основе объединенного принципа максимума. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки.* 2004;S2:13–18. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/identifikatsiya-parametrov-dinamicheskih-sistem-na-osnove-obedinennogo-printsipa-maksimuma/viewer (дата обращения: 09.08.2023).

9. Аргучинцев А. В. *Оптимальное управление начально-краевыми условиями гиперболических систем.* Дис. д-ра физ.-мат. наук. Иркутск; 2004. 237 с.

10. Дерюшев В.В., Коробецкий Д.И., Сорокина Д.Н. Математическая модель построения комплексного показателя безопасности эксплуатации грузоподъемных машин. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2019;(4):13–18. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-4-13-18

11. Marchenko Ju.V., Popov S.I. The use of a unified container in an ecological automated system for the removal of solid household waste in an urbanized environment based on rope transport technologies. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023;575:1304–1311. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-21219-2_146 (дата обращения: 24.09.2023).

12. Черных С.В. Многопараметрическая оптимизация многомодальных функций. *Вестник Российского государственного университета им. И. Канта*. 2010;(10):94–103. URL: https://journals.kantiana.ru/upload/iblock/367/iimdxxrrccww.pdf (дата обращения: 09.08.2023).

References

1. Korotkii AA, Lagerev AV, Meskhi BCh, Lagerev IA, Panfilov AV. *Razvitie transportnoi infrastruktury krupnykh gorodov i territorii na osnove tekhnologii kanatnogo metro.* Rostov-on-Don: Don State Technical University; 2017. 344 p. URL: http://ntb.donstu.ru/content/razvitie-transportnoy-infrastruktury-krupnyh-gorodov-i-territoriy-na-osnove-tehnologii-kanatnogo-metro (accessed: 25.08.2023). (In Russ.).

2. Lagerev AV, Lagerev IA. Optimizatsiya shaga ustanovki promezhutochnykh opornykh konstruktsii vdol' linii kanatnogo metro. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014;4:22–30. URL: http://vestnik-brgu.ru/wp-content/numbers/v2014_4.pdf (accessed: 09.08.2023). (In Russ.).

3. Korotky AA, Marchenko EV, Popov SI, Marchenko JuV, Dontsov NS. Theoretical foundations of modeling the process of transport vehicles steel ropes structural defects formation. In: *E3S Web of Conferences*. 2020;175:05018. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505018

4. Kinzhibalov AV. *Povyshenie bezopasnosti passazhirskikh kanatnykh dorog na osnove otsenki riska i rezervirovaniya privoda.* Author's abstract. Novocherkassk; South-Russian State Technic University: 2008. 24 p. URL: https://viewer.rusneb.ru/ru/000199_000009_003457469?page=1&rotate=0&theme=white (accessed: 09.08.2023). (In Russ.).

5. Korotky AA, Marchenko EV, Ivanov VV, Popov SI, Marchenko JuV, Dontsov NS. Model of forming vibration mechanochemical solid lubrication coating on surface of steel rope. In: *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2019;403:012116. https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012116

6. Marchenko JuV, Korotky AA, Popov SI, Marchenko EV, Galchenko GA, Kosenko VV. Municipal waste management in an urbanized environment based on ropeway technology. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022;246:235–241. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_26

7. Anisimov VN, Litvinov VL. Transverse vibrations rope moving in longitudinal direction. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017;19(4):161–166. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/poperechnye-kolebaniya-kanata-dvizhuschegosya-v-prodolnom-napravlenii/viewer (accessed: 09.08.2023). (In Russ.).

8. Kostoglotov AA, Deryushev VV, Kostoglotov AI. Identifikatsiya parametrov dinamicheskikh sistem na osnove ob"edinennogo printsipa maksimuma. *Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus region. Natural sciences.* 2004;S2:13–18. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/identifikatsiya-parametrov-dinamicheskih-sistem-na-osnove-obedinennogo-printsipa-maksimuma/viewer (accessed: 09.08.2023). (In Russ.).

9. Arguchintsev AV. *Optimal'noe upravlenie nachal'no-kraevymi usloviyami giperbolicheskikh sistem.* Author's abstract. Irkutsk; 2004. 237 p. (In Russ.).

10. Deryushev VV, Korobetskiy DI, Sorokina DN. Mathematical model of construction of the complex index of safe operation of hoisting machines. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2019;4:13–18. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-4-13-18

11. Marchenko JuV, Popov SI. The use of a unified container in an ecological automated system for the removal of solid household waste in an urbanized environment based on rope transport technologies. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023;575:1304–1311. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_146

12. Chernykh SV. Mnogoparametricheskaya optimizatsiya mnogomodal'nykh funktsii. *Vestnik of Immanuel Kant Russian State University.* 2010;(10):94–103. URL: https://journals.kantiana.ru/upload/iblock/367/iimdxxrrccww.pdf (accessed: 09.08.2023). (In Russ.).

Поступила в редакцию 12.10.2023
Поступила после рецензирования 29.10.2023
Принята к публикации 01.11.2023

Об авторах

Марченко Юлианна Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, AuthorID, ORCID, marchenko-6470@mail.ru

Дерюшев Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID

Попов Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент, кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID, spopov1957@yandex.ru

Марченко Эдвард Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и мехатроники Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, AuthorID, ORCID, daedwardrambler.ru@mail.ru

Заявленный вклад соавторов

Ю.В. Марченко, С.И. Попов — разработка концепции исследования, функциональной схемы транспортировки твердых бытовых отходов, схемы функционального взаимодействия основных показателей системы, разработка иерархической структуры критериев.

Ю.В. Марченко — постановка и решение задачи многокритериальной оптимизации для систем с сосредоточенными и распределенными параметрами.

Э.В. Марченко — определение оптимизируемых параметров канатной дороги, рассмотрение примеров комплексных показателей технической сложности построения и функционирования системы вывоза твердых бытовых отходов грузовым канатным транспортом.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 12.10.2023
Revised 29.10.2023
Accepted 01.11.2023

About the Authors:

Yulianna V. Marchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, AuthorID, ORCID, marchenko-6470@mail.ru

Viktor V. Deryushev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID

Sergey I. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID, spopov1957@yandex.ru

Edward V. Marchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, AuthorID, ORCID, daedwardrambler.ru@mail.ru

Claimed contributorship:

YuV Marchenko, SI Popov: development of the research concept, functional scheme of solid waste transportation, scheme of functional interaction of the system main indicators, development of the hierarchical structure of criteria.

YuV Marchenko: formulation and solution of the problem of multi-criteria optimization for systems with concentrated and distributed parameters.

EV Marchenko: determination of the optimized parameters of a cable car, consideration of the examples of complex indicators of the technical complexity of the construction and functioning of the solid waste removal system by cargo cable transport.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY





УДК 54.03
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-97-105

Научная статья

Исследование адсорбционных свойств электропроводящего пиролизованного полиакрилонитрила, модифицированного оксидом хрома (III), для получения высокоэффективных сенсоров газов

М.М. Авилова [1] ✉, **Н.В. Золотарева** [2]
[1] Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2] Астраханский государственный университет, Астрахань, Российская Федерация

✉ m.avir89@yandex.ru

Аннотация
Введение. Получение высокочувствительных сенсоров газа является актуальной задачей, решение которой позволит точно и быстро оценивать изменения в воздушно-газовом составе заданной среды. К наиболее дешевым и экологичным газочувствительным материалам, отличающимся быстрым откликом, относятся сенсоры газов на основе металлсодержащих пиролизованных полиакрилонитрилов (Ме-пПАН). Одним из видов сенсорных материалов, входящих в перечень Ме-пПАН, является пиролизованный полиакрилонитрил (пПАН), модифицированный молекулой оксида хрома (III). Причины селективной адсорбции у пПАН и у Ме-пПАН к газам-поллютантам, которые позволили бы управлять данным процессом и получать сенсорные материалы с повышенной чувствительностью к газам, в настоящее время не изучены. Поэтому целью данной работы было установление основных причин селективной адсорбции полупроводниковых электропроводящих пленок методами моделирования в рамках молекулярной и квантовой механики.
Материалы и методы. Использовались методы моделирования в рамках молекулярной и квантовой механики (ММ2), метод теории функционала плотности (COSMO) и полуэмпирический PM7-метод в программном пакете MOPAC.
Результаты исследования. Методами ММ2 и PM7 получены модели адсорбционных комплексов систем «Cr-пПАН — газ-загрязнитель». Рассчитаны термодинамические параметры системы для стандартных условий окружающей среды. Установлена зависимость адсорбции газов-загрязнителей на поверхности Cr-пПАН от температуры.
Обсуждение и заключение. В результате расчета термодинамических показателей систем «газ-загрязнителель — пПАН/Ме-пПАН» и получения положительных значений величин энергий Гиббса данных систем потверждено, что адсорбция газов-загрязнителей на поверхности Cr-пПАН не является спонтанным и самопроизвольным явлением и эффективна при высоких температурах. Учитывая, что при внедрении оксида хрома (III) в матрицу пПАН, происходит увеличение заряда на атомах азота, можно сделать вывод о положительном влиянии молекулы оксида хрома (III) на полупроводниковые свойства пПАН. Установлено, что на поверхностях пПАН и Cr-пПАН наиболее вероятна адсорбция газов-загрязнителей (SO_2 и NO_2). Результаты, полученные в работе, можно использовать для получения газочувствительных материалов с заданными метрологическими характеристиками.
Ключевые слова: пиролизованный полиакрилонитрил (пПАН), хромсодержащий полиакрилонитрил, квантово-химическая модель, молекулярное моделирование, адсорбция газов-загрязнителей, полуэмпирический метод, электронная плотность, термодинамика процесса адсорбции

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Авилова М.М., Золотарева Н.В. Исследование адсорбционных свойств электропроводящего пиролизованного полиакрилонитрила, модифицированного оксидом хрома (III), для получения высокоэффективных сенсоров газов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(4):97–105. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-97-105

Original article

Investigation of the Adsorption Properties of Electrically Conductive Pyrolyzed Polyacrylonitrile Modified with Chromium (III) Oxide to Obtain Highly Efficient Gas Sensors

Marta M. Avilova [1] ✉, **Natalya V. Zolotareva** [2]
[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2] Astrakhan Tatishchev State University, Astrakhan, Russian Federation
✉ m.avir89@yandex.ru

Abstract
Introduction. Obtaining highly sensitive gas sensors is an urgent task, the solution to which will allow you to accurately and quickly assess changes in the air-gas composition of a given medium. Gas sensors based on metal-containing pyrolyzed polyacrylonitriles (Me-pPAN) are among the cheapest and most environmentally friendly gas-sensitive materials with a fast response. One of the types of sensor materials included in the Me-pPAN list is pyrolyzed polyacrylonitrile (pPAN) modified with a chromium (III) oxide molecule. The reasons for selective adsorption of pPAN and Me-pPAN to pollutant gases, which would allow controlling this process and obtaining sensory materials with increased sensitivity to gases, are not enough studied. Therefore, the aim of this work was to establish the main causes of selective adsorption of semiconductor electrically conductive films by modeling methods in the framework of molecular and quantum mechanics.
Materials and Methods. The authors used modeling methods in the framework of molecular and quantum mechanics (MM2), the density functional theory (COSMO) method and the semi-empirical PM7 method in the MOPAC software package.
Results. MM2 and PM7 methods were used to obtain models of adsorption complexes of "Cr-pPAN – gas-pollutant" systems. Thermodynamic parameters of the system were calculated for standard environmental conditions. The dependence of the adsorption of pollutant gases on the surface of Cr-pPAN on temperature has been established.
Discussion and Conclusion. As a result of calculating the thermodynamic parameters of gas-pollutant–pPAN/Me-pPAN systems and obtaining positive values of Gibbs energies of these systems, it was confirmed that the adsorption of polluting gases on the surface of Cr-pPAN was not a spontaneous phenomenon and was effective at high temperatures. Considering that when chromium (III) oxide was introduced into the pPAN matrix, the charge on nitrogen atoms increased. It could be concluded that a chromium (III) oxide molecule had a positive effect on the semiconductor properties of pPAN. It was found that the adsorption of polluting gases (SO_2 and NO_2) was most likely on the surfaces of pPAN and Cr-pPAN. The results obtained in the work can be used to obtain gas-sensitive materials with specified metrological characteristics.
Keywords: pyrolyzed polyacrylonitrile (pPAN), chromium-containing polyacrylonitrile, quantum chemical model, molecular modeling, adsorption of pollutant gases, semi-empirical method, electron density, thermodynamics of the adsorption process

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Avilova MM, Zolotareva NV. Investigation of the Adsorption Properties of Electrically Conductive Pyrolyzed Polyacrylonitrile Modified with Chromium (III) Oxide to Obtain Highly Efficient Gas Sensors. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):97–105. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-97-105

Введение. Быстрое отслеживание изменений состава воздушной смеси в атмосферном воздухе и в рабочей зоне промышленного предприятия является необходимой мерой для оценки воздействия производственной деятельности на окружающую среду. Для указанных целей используют датчики газов резистивного типа, основанные на модифицированных нанокомпозитных полупроводниковых материалах [1–7]. Наиболее дешевыми и экологичными, а также отличающимися быстрым откликом на наличие в воздушной смеси газов-загрязнителей (NO_2, Cl_2, H_2S, CO), среди датчиковых устройств являются сенсоры газов на основе металлсодержащих пиролизованных полиакрилонитрилов (Ме-пПАН) [8–11].

В работах [12–16] для установления причин выборочной адсорбции газов-загрязнителей на поверхности пиролизованного полиакрилонитрила (пПАН), модифицированного оксидами металлов, осуществлялось моделирование контактных процессов методами квантовой и молекулярной механики. В ходе проведенных исследований было установлено, что одним из перспективных газочувствительных материалов является пПАН, модифицированный добавками хрома (Cr-пПАН) [17]. Основополагающей причиной использования данного материала является регистрация высоких показателей электропроводящей способности, более, чем в девять раз превышающих показатели для немодифицированного пПАН [11, 12].

Согласно проведенным в работах [11, 17] исследованиям, было показано, что Cr-модифицированная поверхность пПАН обладает уникальной особенностью и селективностью адсорбции по отношению к NO_2, Cl_2 и NH_3 при стандартных условиях окружающей среды. С целью установления причин селективной газочувствительности у Cr-пПАН были проведены исследования методами квантовой и молекулярной механики [17]. В результате исследований определено, что при адсорбции газа-загрязнителя на поверхности сенсора-Cr-пПАН между компонентами системы происходит Ван-дер-Ваальсовое взаимодействие на уровне 3,5Å–5Å.

В соответствии [18, 19] известно, что наличие модифицирующей добавки в пПАН способствует увеличению его полупроводниковых свойств, что было продемонстрированно в ранее опубликованных работах. Согласно [17], методом COSMO в рамках теории функционала плотности подтверждено, что внедрение молекул оксида хрома (III) в структуру пПАН приводит к повышению полупроводниковых свойств.

Тонкопленочный материал на основе Cr-пПАН получается в результате полимеризации хромкарбонильного ПАН при температурах ИК-отжига от 200 °C до 400 °C [7]. Исходя из данных рентгеновской эмиссионной спектроскопии [11], пленки Cr-пПАН представляют из себя матрицу пПАН с внедренной в межплоскостное пространство молекулой оксида хрома (III).

В предыдущих работах [12–17], посвященных исследованию взаимодействия газов-загрязнителей с поверхностью Cr-пПАН, не учитывалось влияние условий окружающей среды на адсорбционные процессы. В настоящее время причины селективной адсорбции у пПАН и у Ме-пПАН к газам-поллютантам, которые позволили бы управлять данным процессом и получать сенсорные материалы с повышенной чувствительностью к газам, не изучены. Помимо этого, важной задачей является оценка эффективности процессов адсорбции газов-загрязнителей на поверхности Cr-пПАН при различных температурных режимах, выбор условий, обеспечивающих наиболее выгодное взаимодействие компонентов в системе «Cr-пПАН – газ-загрязнитель». Поэтому целью данной работы явилось определение основных причин селективной адсорбции у полупроводниковых электропроводящих пленок методами моделирования в рамках молекулярной и квантовой механики, а также изучение в рамках теории функционала плотности процесса формирования пПАН, модифицированного молекулой оксида хрома (III). В рамках поставленной цели основной задачей исследования для получения высокоэффективных сенсоров газов явилось изучение адсорбционных свойств электропроводящего пиролизованного полиакрилонитрила, модифицированного оксидом хрома (III).

Материалы и методы. Вычисление термодинамических параметров процесса взаимодействия газов-загрязнителей с Cr-пПАН проводились с применением полуэмпирических методом в рамках программы MOPAC.

В рамках метода ММ2 сначала были получены энергетически выгодные конфигурации исходных соединений — оксида хрома (III) в матрице пПАН, немодифицированной модели пПАН, а также смоделированы адсорбционные комплексы (АК) «Cr-пПАН – газ-загрязнитель» и рассчитаны энергии взаимодействия (рис. 1). Затем с целью прогнозирования адсорбции газов-загрязнителей (H_2S, NH_3, CH_4, CO_2, NO_2, SO_2, O_3, CO, Cl_2) на поверхности Cr-пПАН были вычислены термодинамические параметры процесса полуэмпирическим PM7-методом в программе MOPAC.

При реализации расчетов исходные структуры и модели адсорбционных комплексов «Cr-пПАН – газ-загрязнитель» подвергались предварительной оптимизации методом покоординатного спуска. На данном этапе моделирования проводили оценку расстояний от крайнего атома молекулы адсорбата до ближайшего атома адсорбента — модифицированной и/или немодифицированной поверхности пПАН.

В рамках PM7-метода оценивали спонтанность возникновения взаимодействия и эффективность процесса адсорбции газов-загрязнителей на поверхности немодифицированного пПАН и на модифицированной поверхности Cr-пПАН.

На каждом этапе были вычислены термодинамические параметры (ΔH, ΔS, ΔG) процессов при температуре 298 К по следующим формулам:

$$\Delta H_{\text{адсорбции}} = \Delta H_{\text{АКС}} - \left(\Delta H_{\text{газ}} + \Delta H_{\text{поверхность}}\right);$$

$$\Delta S_{\text{адсорбции}} = \Delta S_{\text{АКС}} - \left(\Delta S_{\text{газ}} + \Delta S_{\text{поверхность}}\right);$$

$$\Delta G_{\text{адсорбции}} = \Delta H_{\text{адсорбции}} - T\Delta S_{\text{адсорбции}} .$$

Для построения схем взаимодействия вычисляли зарядовые (q_A, а.е.), пространственные (r, Å) характеристики и величину переноса заряда (Δq, а.е.) в модельных адсорбционных комплексах.

Результаты исследования. Модель кластера Cr-пПАН, полученная в рамках методов MM2 и PM7, представлена матрицей пПАН с внедренной в межплоскостное пространство молекулой оксида хрома (III) (рис. 1). Расстояние между взаимодействующими атомами внутри полости фиксировалось на уровне значений 2,0–3,0 Å.

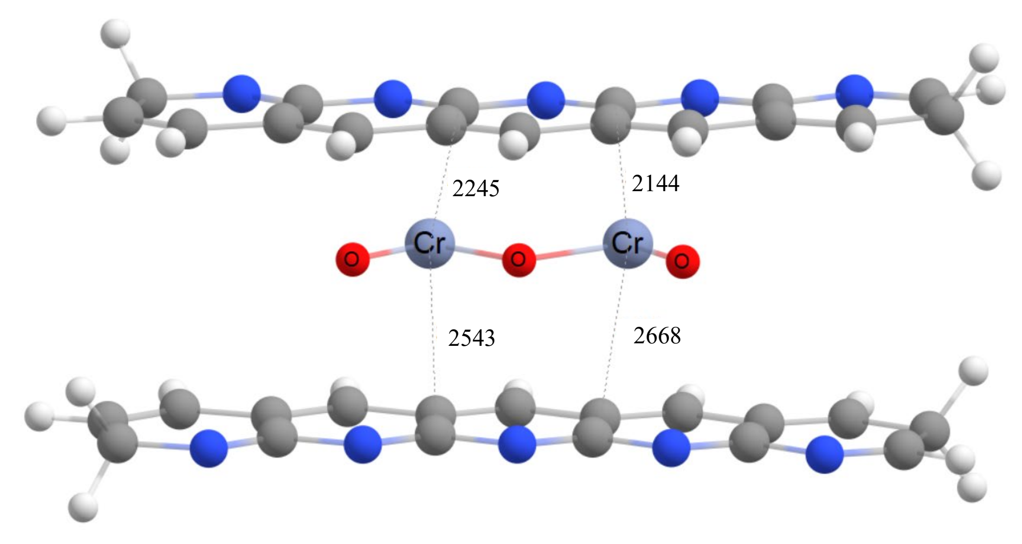


Рис. 1. Модель кластера пПАН, модифицированного молекулой оксидом хрома (III)

Для примера ниже представлена схема процесса адсорбции сероводорода:

$$Cr_2O_3(ПАН)_2 + H_2S \Rightarrow [Cr_2O_3(ПАН)_2…H_2S].$$

Аналогично были сформированы схемы адсорбции других газов-загрязнителей. На рис. 2 представлена модель на примере адсобрционного комлекса «Cr-пПАН – SO_2».

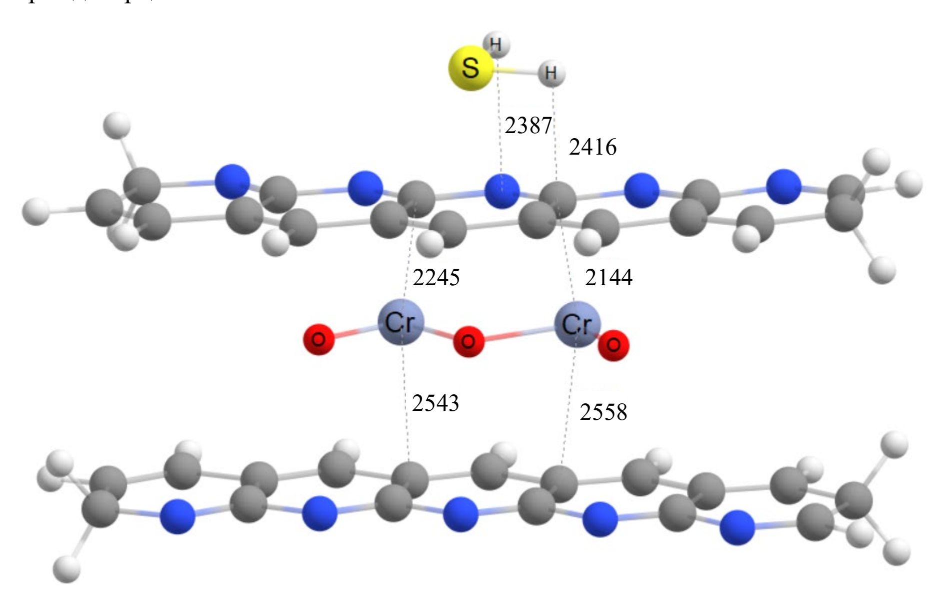


Рис. 2. Модель адсобрционного комлекса «Cr-пПАН – SO_2»

Вычисленные термодинамические параметры процессов адсорбции газов-загрязнителей на модифицированной поверхности, в сравнении с данными по адсорбции данных газов на немодифицированной поверхности пПАН, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Термодинамические параметры процессов адсорбции газов-загрязнителей

Модель взаимодействия	Параметры при 298 K		
	ΔH, Дж/моль	ΔS, Дж/(моль·К)	ΔG, Дж/моль
H_2S…пПАН…Cr_2O_3…пПАН	–29,947	–413,888	93,392
NH_3…пПАН…Cr_2O_3…пПАН	–18,258	–295,817	69,896
CH_4…пПАН…Cr_2O_3…пПАН	–15,134	–264,146	63,581
CO_2…пПАН…Cr_2O_3…пПАН	–8,317	–232,773	61,050
NO_2…пПАН…Cr_2O_3…пПАН	–7,354	–232,601	61,961
SO_2…пПАН…Cr_2O_3…пПАН	–2,291	–208,585	59,868
O_3…пПАН…Cr_2O_3…пПАН	–17,887	–222,424	48,395
CO…пПАН…Cr_2O_3…пПАН	–41,647	–412,237	81,200
Cl_2…пПАН…Cr_2O_3…пПАН	–17,176	–217,306	47,580
H_2S…пПАН…пПАН	–1,215	–146,581	42,466
NH_3…пПАН…пПАН	–4,416	–160,438	43,394
CH_4…пПАН…пПАН	–3,197	–161,675	44,982
CO_2…пПАН…пПАН	–2,472	–150,947	42,510
NO_2…пПАН…пПАН	–0,759	–176,267	51,768
SO_2…пПАН…пПАН	–2,393	–181,495	51,693
O_3…пПАН…пПАН	–2,914	–280,125	80,563
CO…пПАН…пПАН	–2,192	–160,186	45,543
Cl_2…пПАН…пПАН	0,341	–153,047	45,949

В адсорбционном комплексе «Cr-пПАН – газ-загрязнитель» межъядерное расстояние от крайнего атома молекулы исследуемого газа-загрязнителя до ближайшего атома на модифицированной и немодифицированной поверхности пПАН фиксировалось на уровне более 2,5 Å. Эти результаты хорошо согласуются с полученными ранее [17] и подтверждают наличие Ван-дер-Ваальсового взаимодействия, возникающего в адсорбционном комплексе.

Изменение заряда и перераспределение электронной плотности не наблюдается при адсорбции газов-загрязнителей на немодифицированной поверхности пПАН (ΔH на уровне –3,0 кДж/моль).

Установлено, что адсорбция SO_2 и NO_2 равнозначно возможна как на модифицированной поверхности, так и на немодифицированной поверхности пПАН, поскольку в результате адсорбции данных газов-зарязнителей существенных изменений в электронной плотности на поверхности Cr-пПАН не происходит.

Из представленного перечня газов-загрязнителей только газ CO показывает зашкаливающие результаты для модифицированной поверхности. В процессе адсорбции осуществляется не только максимальное сближение между взаимодействующими атомами, но и увеличение показателя переноса заряда (Δq) с 0,3 а.е. для немодифицированной поверхности до 1,2 а.е. для модифицированной поверхности.

Обсуждение и заключение. Рассчитанные термодинамические параметры системы для стандартных условий окружающей среды, представленные в таблице 1, показывают, что адсорбция газов не может быть отнесена к спонтанному и самопроизвольному процессу (ΔG > 0). Установленная при исследовании процессов адсорбции газов-загрязнителей общая упорядоченность системы демонстрирует, что адсорбция эффективна при высоких температурах.

Увеличение заряда в Cr-пПАН и перераспределение электронной плотности наиболее эффективны при адсорбции газов-загрязнителей, насыщенными атомами водорода, а именно, H_2S, NH_3, CH_4.

При адсорбции газов-загрязнителей на поверхности Cr-пПАН подтверждено возникновение Ван-дер-Ваальсового взаимодействия между газами и поверхностью Cr-пПАН. Это обосновано отсутствием изменений в электронной плотности на повехрности Cr-пПАН при взаимодействии с газами-загрязнителями, а также межъядерным расстоянием от крайнего атома молекулы исследуемого газа-загрязнителя до ближайшего атома модифицированной и немодифицированной поверхности пПАН, превышающим 2,5 Å.

Кроме того, исследование показало, что внедрение оксида хрома (III) в матрицу пПАН способствовало увеличению заряда на атомах азота (до/после: –0,366 а.е. заряда / –0,383 а.е. заряда). Это привело к

перераспределению электронной плотности на атомах углерода в циклах (в орто-положении до/после: 0,357/0,428 а.е. заряда; в мета-положении до/после: –0,159/–0,232 а.е. заряда).

В связи с тем, что при внедрении оксида хрома (III) в матрицу пПАН, происходит увеличение заряда на атомах азота, можно сделать вывод о положительном влиянии молекулы оксида хрома (III) на полупроводниковые свойства пПАН.

На основании выполненных расчетов подтверждено, что на поверхностях пПАН и Cr-пПАН наиболее вероятна адсорбция газов-загрязнителей (SO_2 и NO_2).

Таким образом, проведенные теоретические исследования позволяют сделать вывод о том, что модифицирование пПАН молекулами оксида хрома (III) позволяет получать перспективный электропроводящий материал, обладающий свойством селективной адсорбции газов-загрязнителей, который в последующем можно успешно использовать в газовой электронике.

Список литературы

1. Fuyou Ke, Qikang Zhang, Luyao Ji, Yuanyuan Zhang, Chuanxiong Zhang, Jing Xu, et al. Electrostatic adhesion of polyaniline on carboxylated polyacrylonitrile fabric for high-performance wearable ammonia sensor. *Composites Communications*. 2021;27:100817. https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100817

2. Герасимов Г.Н., Громов В.Ф., Иким М.И., Трахтенберг Л.И. Влияние состава и структуры металлоксидных наноструктурированных композитов на их проводящие и сенсорные свойства. *Химическая физика*. 2021;40(11):65–77. https://doi.org/10.31857/S0207401X21110030

3. Боднева В.Л., Кожушнер М.А., Посвянский В.С., Трахтенберг Л.И. Теория чувствительности структурированных на наноуровне слоев оксидов металлов к газам-восстановителям. *Химическая физика*. 2019;38(1):75–80. https://doi.org/10.1134/S0207401X19010060

4. Wang W., Zheng Y., Jin X. et al. Unexpectedly high piezoelectricity of electrospun polyacrylonitrile nanofiber membranes. *Nano Energy*. 2019;56:588–594. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.082

5. Efimov M.N., Sosenkin V.E., Volfkovich Yu.M., Vasilev A.A., Muratov D.G., Baskakov S.A. (et al.). Electrochemical performance of polyacrylonitrile-derived activated carbon prepared via IR pyrolysis. *Electrochemistry Communications* 2018;96:98–102. https://doi.org/10.1016/j.elecom.2018.10.016

6. Imanian Z., Hormozi F., Torab-Mostaedi M., Asadollahzadeh M. Highly selective adsorbent by gamma radiation-induced grafting of glycidyl methacrylate on polyacrylonitrile/polyurethane nanofiber: Evaluation of CO_2 capture. *Separation and Purification Technology*. 2022;289:120749. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120749

7. Kozlov V.V., Karpacheva G.P., Petrov V.S., Lazovskaya E.V. Formation of polyconjugated bonds in polyacrylonitrile by thermal treatment in vacuum. *Polymer science, Series A*. 2001;43(1):20–26. URL: https://www.researchgate.net/publication/289223536_Formation_of_polyconjugated_bonds_in_polyacrylonitrile_by_thermal_treatment_in_vacuum (дата обращения: 02.08.2023).

8. Laffont L., Monthioux M., Serin V. Mathur R.B., Guimon C., Guimon M.F. An EELS study of the structural and chemical transformation of PAN polymer to solid carbon. *Carbon*. 2004;42(12–13):2485–2494. http://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.04.043

9. Yoshida H., Sato N. // Rus. J. Deposition of acrylonitrile cluster ions on solid substrates: thin film formation by intracluster polymerization products. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2006;110:4232–4239. https://doi.org/10.1021/jp0546397

10. Kozlov V.V., Kozhitov L.V., Kostishyn V.G., Morchenko A.T., Muratov D.G. The effective method based on IR annealing for manufacturing novel carbon nanocrystalline material and multifunctional metal-polymer nanocomposites. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *Mater.* Sci. Eng. 2009;5:01202. https://doi.org/10.1088/1757-899X/5/1/012021

11. Ghorpade R.V., Cho D.W., Hong S.C. Effect of controlled tacticity of polyacrylonitrile (co)polymers on their thermal oxidative stabilization behaviors and the properties of resulting carbon films. *Carbon*. 2017;121:502–511. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.06.015

12. Авилова М.М., Марьева Е.А., Попова О.В., Финоченко Т.А. Адсорбция газов на поверхности железосодержащего полиакрилонитрила. *Журнал физической химии*. 2020;94(6):898–902. https://doi.org/10.31857/S0044453720060047

13. Авилова М.М., Марьева Е.А., Попова О.В., Иванова Т.Г. Молекулярное моделирование адсорбции газов-поллютантов на кадмийсодержащем полиакрилонитриле. *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2020;63(4):49–54. https://doi.org/10.6060/ivkkt.20206304.6008

14. Avilova M.M., Mar'eva E.A., Popova O.V., Finochenko T.A. Pollutant gases adsorption on the surface of iron-containing polyacrylonitrile. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2020;94(6):1195–1198. https://doi.org/10.1134/S0036024420060047

15. Avilova M.M., Zolotareva N.V., Popova O.V. The study of the effect of chromium on the semiconductor properties of pyrolyzed polyacrylonitrile by quantum chemistry methods *10th Anniversary International Conference on «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» (PHENMA 2021–2022)*.2022:196–197.

16. Авилова М.М., Попова О.В. Взаимодействие газов-поллютантов с поверхностью тонкоплёночного нанокомпозита на основе пиролизованного полиакрилонитрила. В: *Труды XIX Международной научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии»*. Сочи; Издательство: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского: 2022. С. 308–311.

17. Авилова М.М., Золотарева Н.В., Попова О.В. Молекулярное моделирование взаимодействие кластера хромсодержащего полиакрилонитрила с газами-поллютантами. *Химическая физика*. 2023;42(4):12–19. https://doi.org/10.31857/S0207401X23040027

18. Yena Kim, Eun-Young Park, Deuk Yong Lee, Myung-Hyun Lee, Se-Jong Lee, Bae-Yeon Kim, Nam-Ihn Cho, Electrospun nanofibrous polyacrylonitrile (PAN)/Fe2O3 membrane as CO_2 gas sensors. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2007;44:194–197. https://doi.org/10.4191/kcers.2007.44.4.194

19. Семенистая Т.В., Петров В.В. *Металлсодержащий полиакрилонитрил: состав, структура, свойства.* Монография. Таганрог: Южный федеральный университет; 2015. 169 с.

References

1. Fuyou Ke, Qikang Zhang, Luyao Ji, Yuanyuan Zhang, Chuanxiong Zhang, Jing Xu, et al. Electrostatic adhesion of polyaniline on carboxylated polyacrylonitrile fabric for high-performance wearable ammonia sensor. *Composites Communications.* 2021;27:100817. https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100817

2. Gerasimov GN, Gromov VF, Ikim MI, Trakhtenberg LI. Vliyanie sostava i struktury metalloksidnykh nanostrukturirovannykh kompozitov na ikh provodyashchie i sensornye svoistva. *Khimicheskaya fizika.* 2021;40(11):65–77. https://doi.org/10.31857/S0207401X21110030 (In Russ.).

3. Bodneva VL, Kozhushner MA, Posvyanskii VS, Trakhtenberg LI. Teoriya chuvstvitel'nosti strukturirovannykh na nanourovne sloev oksidov metallov k gazam-vosstanovitelyam. *Khimicheskaya fizika.* 2019;38(1):75–80. https://doi.org/10.1134/S0207401X19010060 (In Russ.).

4. Wenyu Wang, Yide Zheng, Xin Jin, Yue Sun, Binbin Lu, Hongxia Wang, et al. Unexpectedly high piezoelectricity of electrospun polyacrylonitrile nanofiber membranes. *Nano Energy*. 2019;56:588–594. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.082

5. Efimov MN, Sosenkin VE, Volfkovich YuM, Vasilev AA, Muratov DG, Baskakov SA, et al. Electrochemical performance of polyacrylonitrile-derived activated carbon prepared via IR pyrolysis. *Electrochemistry Communications* 2018;96:98–102. https://doi.org/10.1016/j.elecom.2018.10.016

6. Zahra Imanian, Faramarz Hormozi, Meisam Torab-Mostaedi, Mehdi Asadollahzadeh. Highly selective adsorbent by gamma radiation-induced grafting of glycidyl methacrylate on polyacrylonitrile/polyurethane nanofiber: Evaluation of CO_2 capture. *Separation and Purification Technology.* 2022;289:120749. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120749

7. Kozlov VV, Karpacheva GP, Petrov VS, Lazovskaya EV. Formation of polyconjugated bonds in polyacrylonitrile by thermal treatment in vacuum. *Polymer science, Series A.* 2001;43(1):20–26. URL: https://www.researchgate.net/publication/289223536_Formation_of_polyconjugated_bonds_in_polyacrylonitrile_by_thermal_treatment_in_vacuum (accessed: 02.08.2023).

8. Laffont L, Monthioux M, Serin V, Mathur RB, Guimon C, Guimon MF. An EELS study of the structural and chemical transformation of PAN polymer to solid carbon. *Carbon.* 2004;42(12–13):2485–2494. http://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.04.043

9. Hiroyuki Yoshida, Naoki Sato. Deposition of acrylonitrile cluster ions on solid substrates: thin film formation by intracluster polymerization products. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2006;110:4232–4239. https://doi.org/10.1021/jp0546397

10. Kozhitov LV, Kozlov VV, Kostishyn VG, Morchenko AT, Muratov DG. The effective method based on IR annealing for manufacturing novel carbon nanocrystalline material and multifunctional metal-polymer nanocomposites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Mater.* Sci. Eng. 2009;5:01202. https://doi.org/10.1088/1757-899X/5/1/012021.

11. Ravindra V Ghorpade, Dong Won Cho, Sung Chul Hong. Effect of controlled tacticity of polyacrylonitrile (co)polymers on their thermal oxidative stabilization behaviors and the properties of resulting carbon films. *Carbon*. 2017;121:502–511. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.06.015

12. Avilova MM, Mar'eva EA, Popova OV, Finochenko TA. Pollutant gases adsorption on the surface of iron-containing polyacrylonitrile. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2020;94(6):898–902. https://doi.org/10.31857/S0044453720060047 (In Russ.).

13. Avilova MM, Mar'yeva EA, Popova OV, Ivanova TG. Molecular modeling of adsorption of pollutant gases on cadmium-containing polyacrylonitrile. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, seriya khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2020;63(4):49–54. https://doi.org/10.6060/ivkkt.20206304.6008 (In Russ.).

14. Avilova MM, Mar'eva EA, Popova OV, Finochenko TA. Pollutant gases adsorption on the surface of iron-containing polyacrylonitrile. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2020;94(6):1195–1198. https://doi.org/10.1134/S0036024420060047

15. Avilova MM, Zolotareva NV, Popova OV. The study of the effect of chromium on the semiconductor properties of pyrolyzed polyacrylonitrile by quantum chemistry methods. In: *10th Anniversary International Conference on «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» (PHENMA 2021-2022)*.2022:196-197.

16. Avilova MM, Popova O.V. Vzaimodeistvie gazov-pollyutantov s poverkhnost'yu tonkoplenochnogo nanokompozita na osnove pirolizovannogo poliakrilonitrila. In: *Trudy XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii.* Sochi; Publishing house: Assotsiatsiya vypusknikov i sotrudnikov VVIA imeni professora N.E. Zhukovskogo: 2022. P. 308–311. (In Russ.).

17. Avilova MM, Zolotareva NV, Popova OV. Molekulyarnoe modelirovanie vzaimodeistvie klastera khromsoderzhashchego poliakrilonitrila s gazami-pollyutantami. *Khimicheskaya fizika.* 2023;42(4):12–19. https://doi.org/10.31857/S0207401X23040027 (In Russ.).

18. Yena Kim, Eun-Young Park, Deuk Yong Lee, Myung-Hyun Lee, Se-Jong Lee, Bae-Yeon Kim, et al. Electrospun nanofibrous polyacrylonitrile (PAN)/Fe2O3 membrane as CO_2 gas sensors. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2007;44(4):194–197. https://doi.org/10.4191/kcers.2007.44.4.194

19. Semenistaya TV, Petrov VV. *Metallsoderzhashchii poliakrilonitril: sostav, struktura, svoistva.* Monograph. Taganrog: Southern Federal University; 2015. 169 p. (In Russ.).

Поступила в редакцию 07.09.2023
Поступила после рецензирования 29.09.2023
Принята к публикации 02.10.2023

Об авторах:

Марта Маисовна Авилова, кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID, ScopusID, ORCID, m.avir89@yandex.ru

Наталья Валерьевна Золотарева, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры аналитической и физической химии Астраханского государственного университета (414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 20 А), ResearcherID, AuthorID, ORCID, zoloto.chem@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

М.М. Авилова — проведение расчётов в рамках метода молекулярной механики, подготовка текста, анализ результатов исследования, формирование выводов;

Н.В. Золотарева — проведение расчетов в рамках квантовой химии, доработка текста и корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 07.09.2023
Revised 29.09.2023
Accepted 02.10.2023

About the Authors:

Marta M. Avilova, Cand. Sci. (Chem.), Senior Lecturer of the Life Safety and Environmental Protection Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID, ScopusID, ORCID, m.avir89@yandex.ru

Natalya V. Zolotareva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Analytical and Physical Chemistry Department, Astrakhan Tatishchev State University (20A, Tatishcheva str., Astrakhan, 414056, RF), ResearcherID, ScopusID, ORCID, m.avir89@yandex.ru

Claimed contributorship:

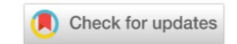
MM Avilova: calculations within the framework of the method of molecular mechanics, text preparation, research results analysis, formulation of the conclusions;

NV Zolotareva: calculations within the framework of quantum chemistry, finalization of the text and conclusions correction.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

УДК 621.785: 669.14.018.29
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-106-118

Научная статья

Роль карбидов в формировании структуры и свойств сталей при импульсном лазерном облучении

Г.И. Бровер ✉, **Е.Е. Щербакова**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ brover@mail.ru

Аннотация

Введение. В современных научных публикациях не существует однозначного суждения и аргументированного металлофизического обоснования роли карбидной фазы облучаемых материалов в формировании требуемой структуры и достижении заданной степени упрочнения поверхностных слоев сталей при импульсной лазерной обработке, особенно, в зоне лазерной закалки из твердого (аустенитного) состояния. Решение этого вопроса имеет большое значение, так как позволяет обоснованно и целенаправленно конструировать требуемую структуру поверхностных слоев изделий разного функционального назначения с высокими эксплуатационными свойствами. Сложность и недостаточно подробная изученность процесса структурообразования в поверхностных слоях сталей при экстремальном тепловом воздействии импульсного лазерного излучения потребовали проведения серии металлофизических экспериментов по изучению тонкого строения сталей после скоростной высокотемпературной закалки. Целью данной статьи явилось получение, количественная оценка и критический анализ массива результатов металлофизических исследований и оценка степени влияния карбидной фазы на формирование структуры и свойств поверхностных слоев сталей в процессе импульсной лазерной закалки на разных режимах, то есть с оплавлением и без оплавления поверхности образцов.

Материалы и методы. В работе поверхностному лазерному облучению на установке «Квант 16» подвергались углеродистые и легированные инструментальные стали. Плотность мощности излучения составляла 70–200 МВт/м^2. При проведении металлофизических исследований использовались оптическая, сканирующая зондовая и электронная микроскопия; методы дифрактометрического, спектрального и дюрометрического анализа сталей до и после лазерной обработки.

Результаты исследования. Показано, что лазерная обработка сталей с плотностью мощности излучения 130–200 МВт/м^2 приводила к локальному изменению химического состава в лазерно-оплавленных зонах пятна, частичному или полному растворению присутствующих в облучаемом металле карбидов и к увеличению количества остаточного аустенита в оплавленных зонах до 40–60 %. Установлено, что на стали Р6М5 максимально возможная твердость облученных зон достигалась при растворении 30 % карбидов, на сталях 9ХС, ХВГ — 60–70 %. Показано, что при импульсном лазерном облучении с q=70–125 МВт/м^2, то есть без оплавления поверхности стали, вокруг включений карбидов под действием термо-деформационных напряжений на границах композиции «карбид – стальная матрица» формировались «белые зоны». Они обладали нетравимостью, дисперсностью строения и повышенной твердостью (10–12 ГПа). Определено, что максимальная твердость лазерно-закаленного металла в зонах лазерной закалки из твердого состояния достигалась в случае, если «белые зоны» занимали 40 % облученной области стали. Установлено, что дисперсность карбидов в этом случае составляла 0,5–1,5 мкм.

Обсуждение и заключение. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что для получения наилучшего сочетания твердости и вязкости облученных зон при лазерной обработке с оплавлением поверхности сталей разного химического состава необходимо растворить разное количество карбидов. Дисперсное строение лазерно-оплавленных зон стали, наряду с достаточно большим содержанием остаточного аустенита, предопределяют возможность повышения эксплуатационных характеристик облученных материалов, особенно в условиях действия внешних ударных нагрузок.

Анализ проведенных металлофизических исследований, облученных без оплавления поверхности сталей, позволил сделать вывод, что для получения высокой степени упрочнения необходимо и целесообразно обеспечить присутствие в структуре облучаемой стали определенного объема дисперсных карбидов. Формирующаяся при лазерной обработке без оплавления поверхности стали структурная композиция «белых зон» способствует получению уникального уровня эксплуатационных свойств.
Результаты выполненных исследований вносят вклад в теорию структурообразования сталей в условиях экстремального теплового воздействия, а также позволяют осуществлять рациональный выбор режимов поверхностной лазерной обработки изделий и гарантированно обеспечивать их работоспособность.

Ключевые слова: карбиды в стали, лазерное облучение, структура, свойства

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их усовершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования. Бровер Г.И., Щербакова Е.Е. Роль карбидов в формировании структуры и свойств сталей при импульсном лазерном облучении. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(4):106–118. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-106-118

Original article

The Role of Carbides in Forming the Steels Structure and Properties under Pulsed Laser Irradiation

Galina I. Brover ✉, **Elena E. Shcherbakova**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ brover@mail.ru

Abstract
Introduction. At present, in scientific publications, there is no unambiguous understanding and reasoned metal physical justification of the role of the carbide phase of irradiated materials in forming the required structure and achieving a given degree of hardening of surface layers of steels during pulsed laser treatment, especially in the zone of laser hardening from a solid (austenitic) state. The solution to this issue is of great importance, since it allows us to reasonably and purposefully design the required structure of surface layers of products of various functional purposes with high performance properties. The complexity and insufficiently detailed study of the process of structure formation in the surface layers of steels under extreme thermal effects of pulsed laser radiation required a series of metal physical experiments to study the fine structure of steels after high-speed high-temperature hardening. The aim of this article was to obtain, quantify and critically analyze the array of results of metal physical studies and to assess the degree of influence of the carbide phase on the formation of structure and properties of surface layers of steels in the process of pulsed laser hardening in different modes, that is, with and without melting the surface of the samples.
Materials and Methods. In the work, carbon and alloyed tool steels were subjected to surface laser irradiation at a Kvant 16 installation. The radiation power density was 70–200 MW/m^2. Optical, scanning probe and electron microscopy were used in conducting metal physical studies, as well as methods of diffractometric, spectral and durometric analysis of steels before and after laser treatment.
Results. It was shown that laser treatment of steels with a radiation power density of 130–200 MW/m^2 led to a local change in the chemical composition in the laser-fused areas of the spot, partial or complete dissolution of carbides present in the irradiated metal and an increase in the amount of residual austenite in the fused areas up to 40–60%. It was found that on P6M5 steel, the maximum possible hardness of the irradiated zones was achieved by dissolving 30% of carbides, on 9XC, HVG steels — 60–70%. It was shown that under pulsed laser irradiation with q=70–125 MW/m^2, that is, without melting the steel surface, "white zones" formed around carbide inclusions under the influence of thermo-deformation stresses at the boundaries of the "carbide – steel matrix" composition. They had irretrievability, dispersion of the structure and increased hardness (10–12 GPa). It was determined that the maximum hardness of laser-hardened metal in the zones of laser hardening from a solid state was achieved if the "white zones" occupied 40% of the irradiated area of steel. It was found that the dispersion of carbides in this case was 0.5–1.5 microns.
Discussion and Conclusion. The results of the conducted studies indicate that in order to obtain the best combination of hardness and viscosity of the irradiated zones during laser treatment with melting of the surface of steels of different chemical composition, it is necessary to dissolve different amounts of carbides. The dispersed structure of laser-fused

steel zones, along with a sufficiently high content of residual austenite, predetermine the possibility of improving the operational characteristics of irradiated materials, especially under conditions of external shock loads.
The analysis of the conducted metal physical studies irradiated without melting the surface of steels allows us to conclude that in order to obtain a high degree of hardening, it is necessary and expedient to ensure the presence of a certain volume of dispersed carbides in the structure of the irradiated steel. The structural composition of "white zones" formed during laser treatment without melting the steel surface contributes to obtaining a unique level of operational properties.
The results of the performed studies contribute to the theory of steel structure formation under conditions of extreme heat exposure and allow for a rational choice of modes of surface laser processing of products and their operability.

Keywords: carbides in steel, laser irradiation, structure, properties

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions for their improvement contributed to a significant improvement in the quality of this article.

For citation. Brover GI, Shcherbakova EE. The Role of Carbides in Forming the Steels Structure and Properties under Pulsed Laser Irradiation. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):106–118. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-106-118

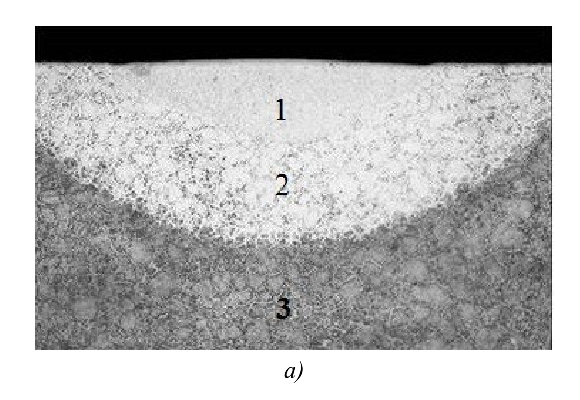
Введение. При импульсном лазерном облучении поверхностные слои материала подвергаются мощному тепловому «удару». В этих условиях появляются высокие градиенты температур, концентраций, а также поля напряжений — термострикционные, фазовые и др. Диссипация приобретенной материалом энергии может осуществляться следующим образом: частичная диссипация внешней энергии по дислокационному механизму путем локальной пластической деформации; диссипация упругой энергии по механизму массопереноса за счет перемещения атомов углерода и легирующих элементов из карбидов в контактирующие с ними твердые растворы к дефектам кристаллического строения и др. [1–4]. Следует отметить, что массоперенос, приводящий к локальному изменению химического состава лазерно-облученных зон стали, играет особенно важную роль в процессе структурообразования многофазных сталей и сплавов, содержащих значительный объем карбидной фазы. Растворение карбидов, даже частичное, влияет на строение и свойства поверхностных слоев сталей и изделий в целом [5–8].

При скоростной лазерной обработке, то есть в условиях дефицита времени последствия растворения карбидов и ускоренного массопереноса могут наблюдаться только в лазерно-оплавленных зонах металла, на их границах с исходной сталью, в тонких областях вокруг карбидов [9–12]. Формирующиеся микроучастки с изменившимися химическим составом, структурой и свойствами имеют большое практическое значение, но недостаточно подробно изучены. Это ограничивает возможности для создания в поверхностных слоях сплава материала с заданной структурой и повышенными эксплуатационными характеристиками. Таким образом, целью данного исследования являлось определение влияние карбидной фазы на формирование структуры и свойств поверхностных слоев сталей в процессе импульсной лазерной закалки на разных режимах, то есть с оплавлением и без оплавления поверхности образцов.

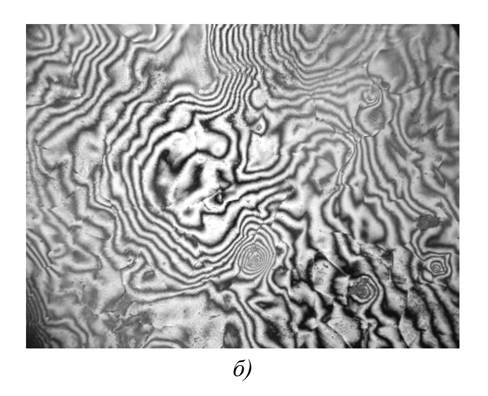
Материалы и методы. Анализ процессов структурообразования в условиях скоростного лазерного нагрева проводился на образцах сталей У8 (ГОСТ 1435 99), Р6М5 (ГОСТ 19265–73), Р18 (ГОСТ 19265–73) и других, подвергнутых предварительной объемной закалке на мартенситную структуру и отпуску.

При проведении металлофизических исследований использовались оптическая, сканирующая зондовая и электронная микроскопия; методы дифрактометрического, спектрального и дюрометрического анализа сталей до и после лазерной обработки. Импульсное лазерное облучение проводилось на технологической установке «Квант-16» (Россия). Изменение энергии излучения, степени расфокусировки луча (3–6 мм), длительности импульса излучения (1–6) 10^{-3} с позволило варьировать плотность мощности излучения в широком диапазоне (70–200 МВт/м^2). Металлографические исследования проводились на поперечных и продольных шлифах на микроскопах МИМ-7 (Россия) и «Neophot-21» (Германия). Исследования тонкой структуры сталей, а также определение химического состава изучаемых зон облученных материалов проводились на сканирующих электронных микроскопах Hitachi TM-1000 (Япония) и Mira3 (Чехия). При рентгеноструктурном анализе использовался дифрактометр ДРОН-0,5 (Россия). Измерения микротвердости осуществлялись на приборе ПМТ-3 (Россия) с нагрузкой 0,49 Н.

Результаты исследования. Металлофизические исследования показали, что облученные зоны на сталях имеют гетерогенное строение по глубине упрочненного слоя. Как видно на рис. 1 *а*, при обработке с плотностью мощности излучения q=130–200 МВт/м^2 наблюдаются оплавленная зона закалки из жидкого состояния (1 — зона ЖС) и зона закалки из твердого состояния (2 — зона ТС).



а)

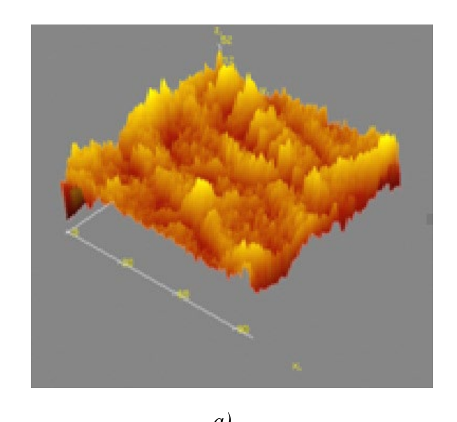


б)

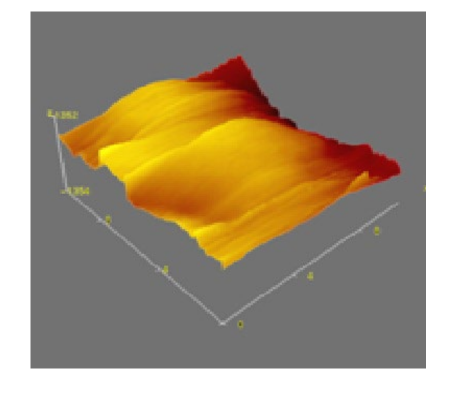
Рис. 1. Микроструктура облученной стали Р6М5: *а* — 1 – зона ЖС,
2 — зона ТС, 3 — исходная сталь (×200);
б — конвективный процесс в зоне оплавления стали (интерференционная микроскопия) (×300)

Далее рассмотрены и описаны особенности формирования структуры и свойств в обеих зонах облученного пятна с учетом влияния на эти процессы присутствующей в сталях карбидной фазы.

Особенностями зоны ЖС являются ее нетравимость в обычных реактивах, дисперсность строения и высокая твердость (8–10 ГПа), а также заметное, даже при использовании оптической микроскопии, уменьшение объема исходной карбидной фазы. Несмотря на малое время воздействия лазерного импульса (10^{-3} с), этому способствуют высокая температура нагрева и конвективное перемешивание тонкого слоя жидкого металла, вызванное действием термострикционных напряжений (рис. 1 *б*). О частичном или полном растворении карбидов свидетельствуют результаты исследований на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) (рис. 2), которые наглядно демонстрируют, что растворение карбидов сглаживает рельеф поверхности около карбидов за счет массопереноса их компонентов в окружающую стальную матрицу.



а)



б)

Рис. 2. Строение поверхностных слоев на стали Р6М5:
а — до лазерного оплавления (СЗМ); *б* — после лазерного оплавления (СЗМ)

Подтверждением возможности частичного растворения карбидов при скоростной лазерной закалке с оплавлением поверхности стали Р6М5 являются также результаты рентгеноструктурного анализа, приведенные на рис. 3.

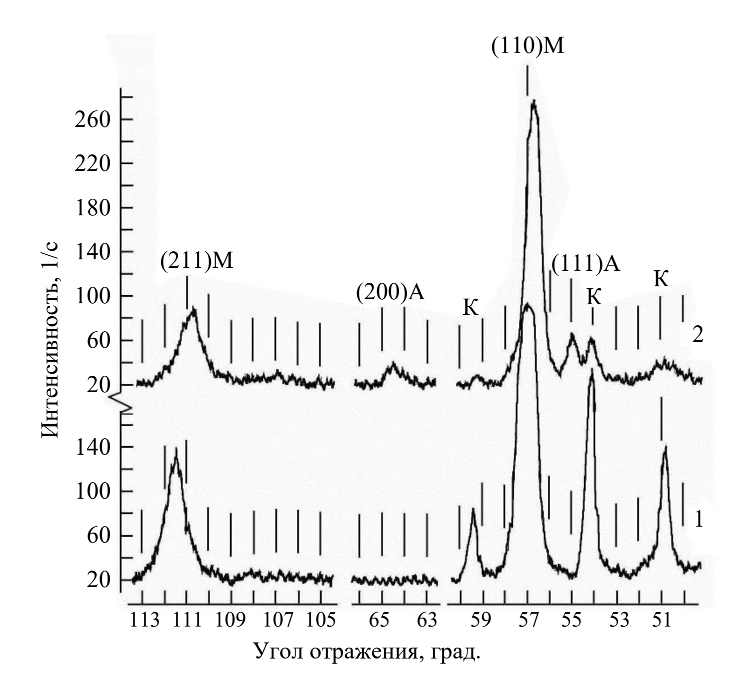
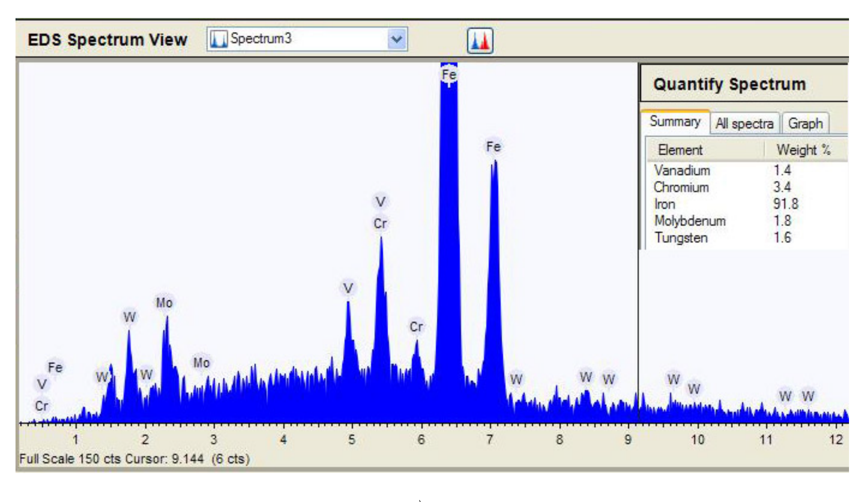


Рис. 3. Фазовый состав стали Р6М5 до (кр. 1) и после (кр. 2) лазерной обработки с оплавлением поверхности

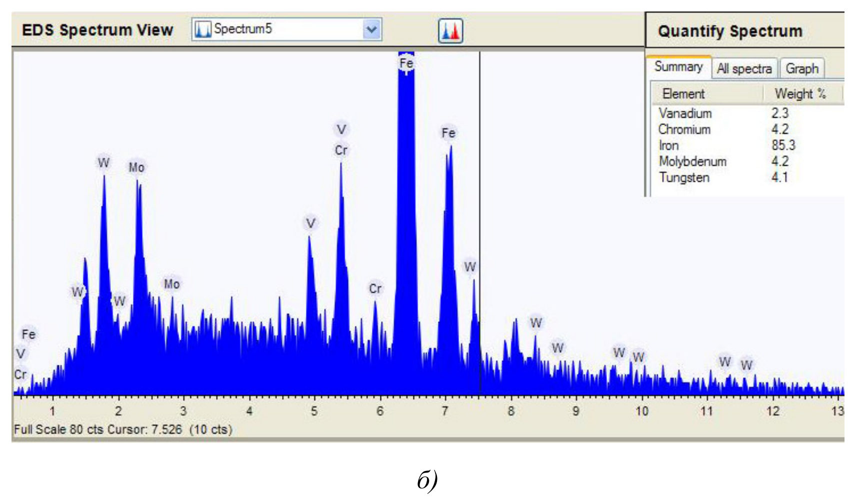
Как видно, лазерное оплавление поверхности стали приводит к уменьшению высоты рефлексов карбидной фазы (К). Их интенсивность изменяется от I=143,24 $с^{-1}$ в исходной стали (рис. 3, кр. 1) до I=65,38 $с^{-1}$ в зоне ЖС (рис. 3, кр. 2). Можно сделать вывод об уменьшении объемной доли карбидов в зоне ЖС. Изменяется также угол расположения карбидов на рентгенограмме. В оплавленной зоне рефлексы карбидов фиксируются на углах 2Q=54,1839 в сравнении с 2Q=54,1219 до лазерной обработки, то есть они смещаются к большим углам отражения. Эти результаты, а также увеличение физического расширения рефлексов карбидной фазы от 0,6392 мрад для исходного металла до 0,9000 мрад для зоны ЖС свидетельствуют об изменении стехиометрического состава карбидов, их частичном растворении и повышении плотности дефектов кристаллического строения.

Как видно на рис. 3, кривая 2, на дифрактограмме наблюдаются также рефлексы аустенита, а рефлексы мартенсита смещаются к меньшим углам отражения. Это является следствием появления участков с высокой насыщенностью атомами углерода и легирующих элементов, а также свидетельствует о высокой дисперсности тонкого строения фаз облученного металла.

На рис. 4 представлены результаты определения локального химического состава зоны лазерной обработки стали Р6М5 с оплавлением поверхности.



а)



б)

Рис. 4. Результаты спектрального химического анализа образцов стали Р6М5:
а — в исходном состоянии; *б* — после лазерной закалки

В результате изменения химического состава понижаются точки мартенситного превращения в зонах ЖС и в них сохраняется значительное количество (40–60 %) [13] остаточного аустенита, характеризующегося дисперсным строением [14–16].

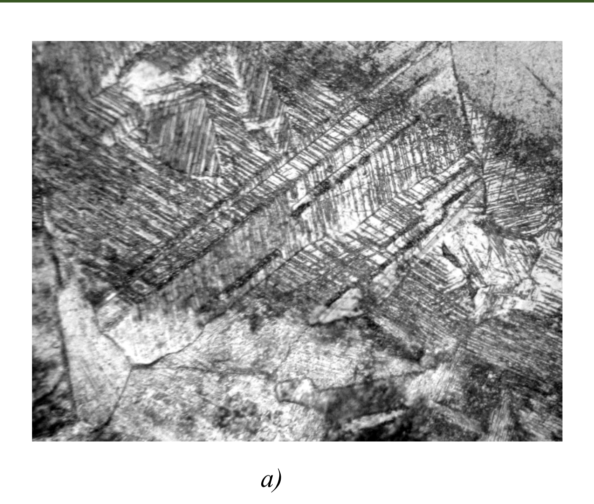
Это оказывает положительное влияние на эксплуатационные свойства облученных изделий, особенно при воздействии внешних ударных нагрузок.

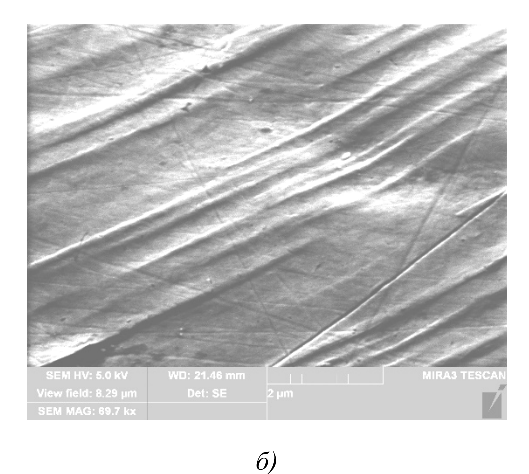
Результаты количественной оценки влияния объема растворившихся карбидов на степень упрочнения поверхностных слоев металла, полученные в ходе дюрометрических исследований облученных на разных режимах сталей, представлены на рис. 5.



Рис. 5. Влияние объема растворившихся карбидов на микротвердость облученных сталей

Рассматривая влияние карбидной фазы на строение зоны ТС, необходимо учесть некоторые особенности процесса импульсного лазерного облучения материалов. Они обусловлены появлением в облучаемых зонах стали термострикционных напряжений, релаксация которых приводит к локальной пластической деформации, повышению плотности дефектов кристаллического строения, динамическому возврату, полигонизации и ранним стадиям рекристаллизации [17, 18]. Происходит также диспергирование структуры, ускорение массопереноса атомов элементов и упрочнение металла в зонах ТС. На рис. 6 представлены наглядные последствия влияния локальной пластической деформации на строение полированных образцов стали 12Х18Н9 после лазерной обработки. Хорошо видны следы деформации в виде линии или полос скольжения.





а) *б)*

Рис. 6. Двойники деформации после лазерной обработки стали 12Х18Н9:
а — оптическая микроскопия (×500); *б* — сканирующая электронная микроскопия (×10 000)

На рис. 7 приведена схема-реконструкция таких характерных структурных особенностей процессов полигонизации и рекристаллизации в зонах лазерной обработки, как формирование развитой субструктуры, измельчение зерен, формирование зерен вокруг включений и др.

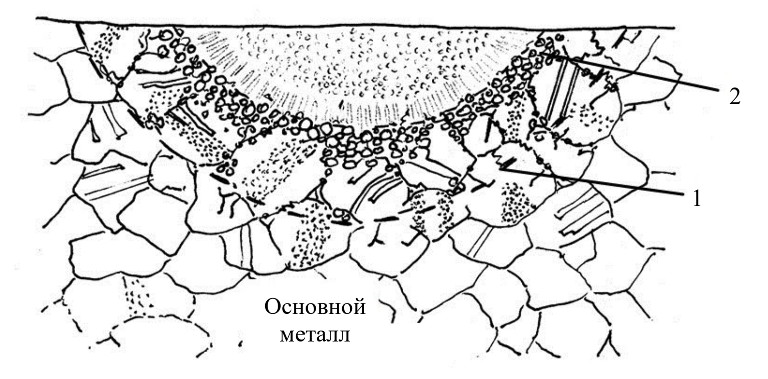
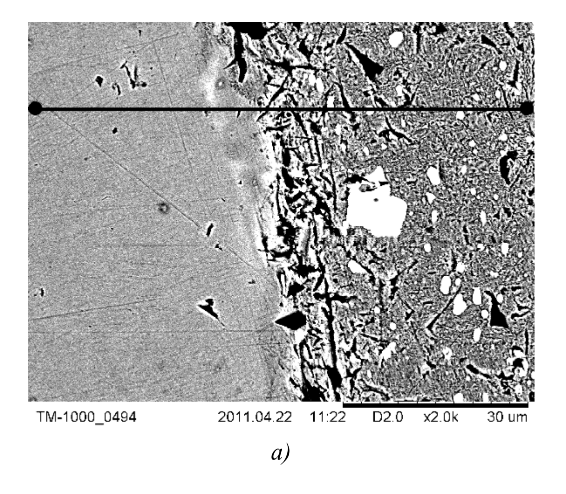
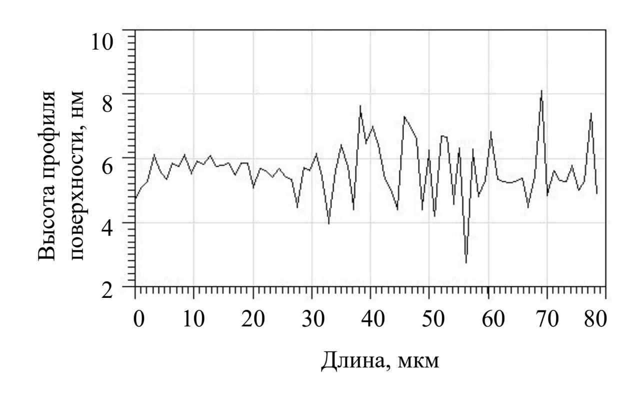


Рис. 7. Схема структурных признаков процессов полигонизации (1) и рекристаллизации (2) в зонах лазерного облучения

Как показали металлофизические исследования, зона лазерной закалки из твердого состояния (зона ТС) имеет дисперсную, плохо травящуюся структуру.

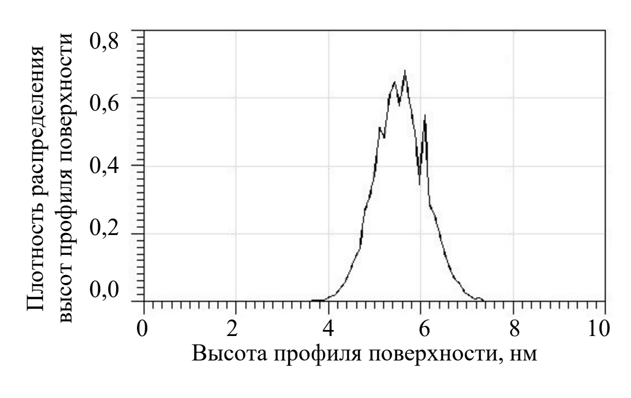




а) *б)*



в)



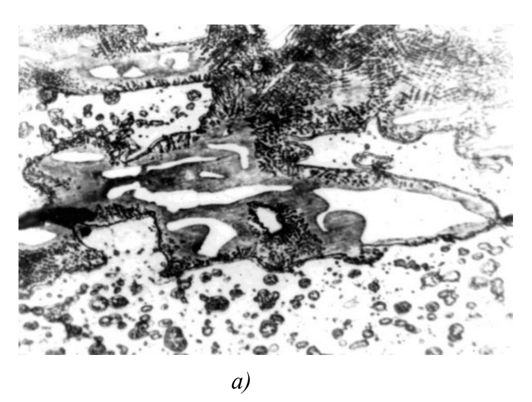
г)

Рис. 8. Микроструктура на облученной стали Р6М5: *а* — профилограмма переходной зоны от исходного металла к зоне ТС; *б* — профилограмма полученная в программе Gwyddion; *в* — гистограмма распределения высот профиля поверхности в основном металле; *г* — гистограмма распределения высот профиля поверхности в зоне ТС

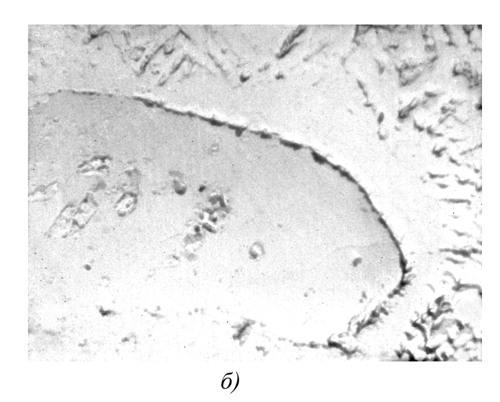
На рис. 8 приведены результаты исследований микроструктуры облученной стали Р6М5 на сканирующем электронном микроскопе.

Как видно, в зоне ТС не вытравливаются карбиды, профилограмма поверхности более ровная, чем в основном металле (рис. 8 *б*) и нет резких колебаний свойств на границах в композициях «карбид – стальная матрица».

Для подтверждения формирования вокруг включений карбидов светлых нетравящихся оболочек с ультрадисперсной структурой («белых зон») проведены металлографические исследования поверхности облученных без оплавления зон стали Р6М5 (рис. 9).



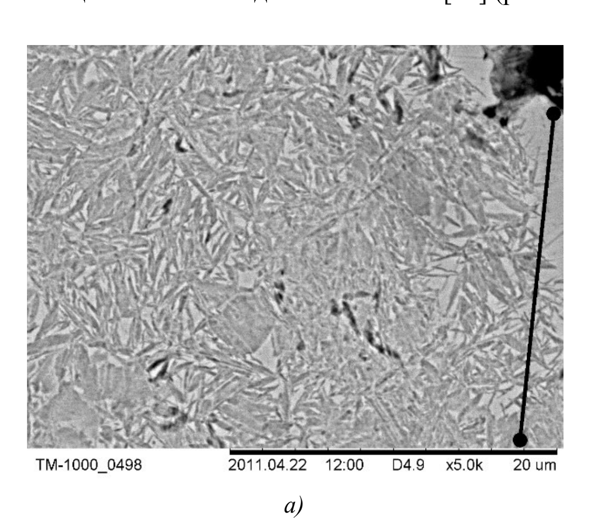
а)



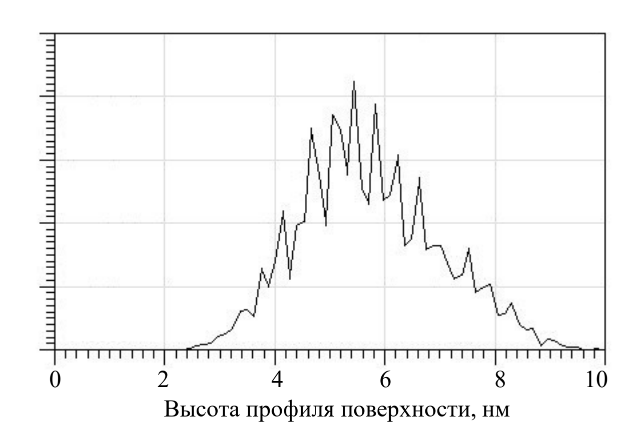
б)

Рис. 9. Приграничное растворение карбидов в облученных без оплавления зонах стали Р6М5:
а — металлографический микроскоп (×800); *б* — электронный микроскоп (×10000)

Исследования структуры «белой зоны» с использованием сканирующего зондового (СЗМ) и атомно-силового микроскопа (АСМ) (рис. 10 *а, в*) показали, что мартенситные кристаллы имеют вид тонких реек толщиной 4–7 нм и длиной ~150 нм [19] (рис. 10 *б*).

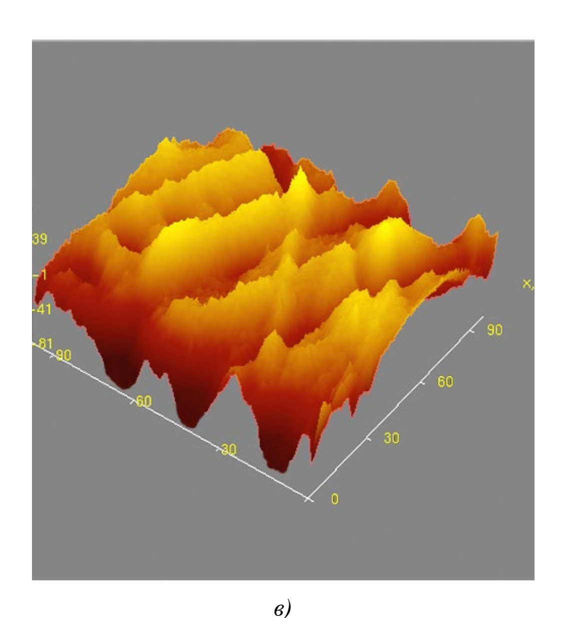


а)



б)

Безопасность техногенных и природных систем. 2023;7(4):106–118. eISSN 2541−9129



в)

Рис. 10. Микроструктура мартенсита лазерной закалки стали Р6М5:
а — СЗМ *Hitachi TM*-1000; *б* — распределение высот профиля игл мартенсита;
в — АСМ — изображение строения «белой зоны»

С целью расширения знаний о тонком строении и свойствах зоны ТС были проведены скретч-тесты на установке Nanotest. Использовался зонд трения, оснащенный тензодатчиком, что позволило определить силу трения между индентором и образцом под действием тяжести калибровочных грузиков.

Обсуждение и заключение. Перечисленные особенности структурного состояния оплавленной зоны могут быть связаны с протеканием при скоростной лазерной обработке процесса динамической высокотемпературной пластической деформации. Это способствует фрагментации дендритной структуры облученных зон стали, ускоряет процессы массопереноса. Подтверждением сказанному является результат определения локального химического состава зоны лазерной обработки стали Р6М5 с оплавлением поверхности. Как видно на рис. 4 *б*, за счет растворения карбидов повышается общий фон интенсивности рефлексов легирующих элементов в сравнении с исходным (рис. 4 *а*) металлом.

На основании приведенных на рис. 5 результатов дюрометрических исследований облученных на разных режимах сталей можно сделать вывод, что для получения максимально возможной твердости при лазерной обработке стали Р6М5 достаточно растворить 30 %, а сталей 9ХС, ХВГ — 60–70 % исходных карбидов. Понижение твердости облученных зон с ростом объема растворившихся карбидов связано, видимо, с увеличением в этих условиях количества остаточного аустенита.

Следует отметить, что при эксплуатации облученных изделий под действием термо-деформационных нагрузок наблюдаемое на рис. 5 понижение твердости компенсирует выделяющееся из аустенита большое количество твердых дисперсных включений карбидов упрочняющего действия [20].

Анализ результатов сканирующей микроскопии поверхности металла показал, что в зоне ТС профилограмма более ровная, чем в основном металле (рис. 8 *б*) и нет резких колебаний свойств на границах в композициях «карбид – стальная матрица». Это свидетельствует о формировании на границах переходных микрообластей с измененным химическим составом. Как видно на рис. 8 *в*, *г*, металл в зоне ТС располагается выше над плоскостью шлифа. Высота профиля поверхности на исходной стали составляет 5,0 нм, а для лазерно-закаленной зоны — 5,8 нм.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что области металла в зоне ТС являются более твердыми и однородными, а также о возможном частичном растворении включений карбидов, которое начинается с границы раздела их со стальной матрицей. Подтверждением является фиксируемое при металлографических исследованиях формирование вокруг включений карбидов светлых нетравящихся оболочек с ультрадисперсной структурой («белых зон») (рис. 9 *а*), что особенно заметно при большом увеличении (рис. 9 *б*). Образованию таких «белых зон» при лазерной обработке сталей с плотностью мощности излучения 70–125 МВ т/м^2 способствуют появляющиеся на границах композиции «карбид – стальная матрица» напряжения разного рода: термострикционные, напряжения, обусловленные разными теплофизическими коэффициентами в композиции и др.

Микротвердость этих участков составляет 10–12 ГПа. Полученные величины твердости соответствуют твердости мартенсита легированных сталей. Можно сделать вывод, что нетравящаяся каемка около частичек карбидов представляет собой мартенсит лазерной закалки.

Сложную структурную картину, которая формируется вокруг включений в результате релаксации напряжений, предложено описать следующим образом. В первую очередь за счет контактного плавления в непосредственной близости от границ карбидов образуется тонкая оболочка жидкого металла, через которую атомы углерода и легирующих элементов из карбидов перемещаются к близлежащим твердым растворам облучаемого пятна. После кристаллизации вокруг карбидов возможно появление супертвердого аморфноподобного каркаса. В остальной части объема «белых зон» $\alpha \rightarrow \gamma$ превращение при нагреве в экстремальных температурно-силовых условиях осуществляется по сдвиговому механизму. Это приводит к пластической деформации и динамической полигонизации аустенита с формированием фрагментированной субструктуры. В процессе скоростной закалки в аустенитной оторочке протекает $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение с наследованием мартенситом фрагментированного строения аустенита.

Результаты металлографических и дюрометрических исследований. показали, что максимальная твердость лазерно-закаленного металла в зонах ТС достигается в случае, если «белые зоны» занимают 40 % облученной области стали. Дисперсность карбидов должна составлять 0,5–1,5 мкм.

Установлено, что при царапании индентором основного металла стали Р6М5 наблюдаются колебания силы трения, вызванные перемещением индентора по неоднородной структуре, состоящей из фаз с разной твердостью. В зоне ТС лазерно-облученного металла значительных колебаний силы трения нет. Можно сделать вывод, что зона ТС относительно однородна по структуре и твердости, причем ее твердость значительно выше, чем твердость основного металла. Об этом свидетельствуют значения силы трения около 17 МН в сравнении с 11 МН для основного металла.

Анализ проведенных металлофизических исследований свидетельствует о том, что при лазерной обработке с плотностью мощности излучения 130–200 МВт/м^2, то есть с оплавлением поверхности сталей разного химического состава, получено наилучшее сочетание твердости и вязкости облученных зон при растворении разного количества карбидов. Вследствие зафиксированного дисперсного строения лазерно-оплавленных зон стали, наряду с достаточно большим содержанием в них остаточного аустенита, появилась возможность повышения эксплуатационных характеристик облученных материалов, особенно в условиях действия внешних ударных нагрузок.

Металлофизические исследования облученных с плотностью мощности излучения 70–125 МВт/м^2, то есть без оплавления поверхности сталей, позволили сделать вывод, что для получения высокой степени упрочнения в этом случае необходимо и целесообразно обеспечить присутствие в структуре облучаемой стали определенного объема дисперсных карбидов. Сформированная при лазерной обработке без оплавления поверхности стали структурная композиция «белых зон» способствовала получению уникального уровня эксплуатационных свойств.

Результаты выполненных исследований внесли вклад в теорию структурообразования сталей в условиях экстремального теплового воздействия, а также позволили осуществлять рациональный выбор режимов поверхностной лазерной обработки изделий разного функционального назначения для гарантированного обеспечения их работоспособности.

Список литературы

1. Гуреев Д.М., Ямщиков С.В. *Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов*. Самара: Издательство Сам. ун-т; 2001. 393 с.

2. Клебанов Ю.Д., Григорьев С.Н. *Физические основы применения концентрированных потоков энергии в технологиях обработки материалов.* Москва: Издательство МГТУ «Станкин»; 2005. 220 с.

3. Xinxin Li, Yingchun Guan. Theoretical fundamentals of short pulse laser – metal interaction: A review. *Nanotechnology and Precision Engineering*. 2020;3(3):105–125. https://doi.org/10.1016/j.npe.2020.08.001

4. Gabdrakhmanov A., Galiakbarov A., Gaisin I. Increasing efficiency of the laser action to materials. *Materials Today: Proceedings*. 2019;19(5):1965–1967. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.052

5. Brover A.V., Brover G.I., Topolskaya I.A. Wear resistance structural aspects of materials after laser processing. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;969: 012008. https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012008

6. Decheng Kong, Chaofang Dong, Xiaoqing Ni, Liang Zhang, Cheng Man, Guoliang Zhu, et al. Effect of TiC content on the mechanical and corrosion properties of Inconel 718 alloy fabricated by a high-throughput dual-feed laser metal deposition system. *Journal of Alloys and Compounds.* 2019;803(1):637–648. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.317

7. Chengkuan Ma, Zhibin Xia, Yifeng Guo, Weifeng Liu, Xuhui Zhao, Qiang Li, et al. Carbides refinement and mechanical properties improvement of H13 die steel by magnetic-controlled electroslag remelting. *Journal of Materials Research and Technology. 2022;*19:3272–3286. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.090

8. Zia Ullah Arif, Muhammad Yasir Khalid, Ehtsham ur Rehman, Sibghat Ullah, Muhammad Atif, Ali Tariq. A review on laser cladding of high-entropy alloys, their recent trends and potential applications. *Journal of Manufacturing Processes.* 2021;68(B):225–273. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.041

9. Li Xing, Wang Quanjie, Zhang Qirui, Guan Yingchun, Zhou Wei. Interface analyses and mechanical properties of stainless steel/nickel alloy induced by multi-metal laser additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;91:53–60. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.02.038

10. Vimalraj S., Varahamoorthi R., Umesh Bala A., Karthikeyan R. Modeling and optimizing the laser parameters for corrosion resistance in 316 SS laser hardfaced surface using tungsten carbide. *Materials Today: Proceedings*. 2020;26(2):2485–2490. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.529

11. Bo Li, Bo Qian, Yi Xu, Zhiyuan Liu, Jianrui Zhang, Fuzhen Xuan. Additive manufacturing of ultrafine-grained austenitic stainless steel matrix composite via vanadium carbide reinforcement addition and selective laser melting: Formation mechanism and strengthening effect. *Materials Science and Engineering: A.* 2019;745:495–508. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.008

12. Yong Chen, Hui Chen, JingQing Chen, Jun Xiong, Ying Wu , ShiYun Dong. Numerical and experimental investigation on thermal behavior and microstructure during selective laser melting of high strength steel. *Journal of Manufacturing*. 2020;57:533–542. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.041

13. Niendorf T., Leuders S., Riemer A., Richard H.A., Tröster T., Schwarze D. Highly anisotropic steel processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions B.* 2013;44(4):794–796. https://doi.org/10.1007/s11663-013-9875-z

14. Michael Katancik, Saereh Mirzababaei, Milad Ghayoor, Somayeh Pasebani. Selective laser melting and tempering of H13 tool steel for rapid tooling applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;849:1563–1572. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156319

15. Brover G.I., Shcherbakova E.E. Aspects of structure formation in surface layers of steel after laser alloying from various coatings. *Metallurgist*. 2022;66:672–680. https://doi.org/10.1007/s11015-022-01375-2

16. Benarji K., Ravi kumar Y., Jinoop A.N., Paul C.P., Bindra K.S. Effect of WC composition on the microstructure and surface properties of laser directed energy deposited SS 316-WC Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(9):6732–6742. https://doi.org/10.1007/s11665-021-05971-2

17. Brover A.V., Brover G.I., Moysova O.B. The role of local plastic deformation in the formation of structure and properties of materials under extreme heating. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;680(1):556–562. https://doi.org/10.1088/1757-899X/680/1/012019

18. Бровер А.В., Бровер Г.И. О протекании процесса рекристаллизации в быстрорежущих сталях при импульсном лазерном облучении. *Вестник Донского государственного технического университета.* 2011;11(9):1601–1610. URL: https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/895/890 (дата обращения: 25.08.2023).

19. Pustovoit V.N., Dombrovskii Y.M., Dolgachev Y.V. Structural identification of the phenomenon of “white zone”. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017;59:3–7. https://doi.org/10.1007/s11041-017-0092-2

20. Brover A.V., Brover G.I. The morphology of carbide and nitride coatings on steels after laser irradiation. *Materials Science Forum.* 2020;989:145–151. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.145

References

1. Gureev DM, Yamshchikov SV. *Osnovy fiziki lazerov i lazernoi obrabotki materialov.* Samara: Samara University publishing house; 2001. 393 p. (In Russ.).

2. Klebanov YuD, Grigorev SN. *Fizicheskie osnovy primeneniya kontsentrirovannykh potokov energii v tekhnologiyakh obrabotki materialov.* Moscow: Publishing house of MSTU "Stankin"; 2005. 220 p. (In Russ.).

3. Xinxin Li, Yingchun Guan. Theoretical fundamentals of short pulse laser – metal interaction: A review. *Nanotechnology and Precision Engineering*. 2020;3(3):105–125. https://doi.org/10.1016/j.npe.2020.08.001

4. Gabdrakhmanov A, Galiakbarov A, Gaisin I. Increasing efficiency of the laser action to materials. *Materials Today: Proceedings*. 2019;19(5):1965–1967. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.052

5. Brover AV, Brover GI, Topolskaya IA. Wear resistance structural aspects of materials after laser processing. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;969: 012008. https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012008

6. Decheng Kong, Chaofang Dong, Xiaoqing Ni, Liang Zhang, Cheng Man, Guoliang Zhu, et al. Effect of TiC content on the mechanical and corrosion properties of Inconel 718 alloy fabricated by a high-throughput dual-feed laser metal deposition system. *Journal of Alloys and Compounds.* 2019;803(1):637–648. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.317

7. Chengkuan Ma, Zhibin Xia, Yifeng Guo, Weifeng Liu, Xuhui Zhao, Qiang Li, et al. Carbides refinement and mechanical properties improvement of H13 die steel by magnetic-controlled electroslag remelting. *Journal of Materials Research and Technology. 2022;*19:3272– 286. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.090

8. Zia Ullah Arif, Muhammad Yasir Khalid, Ehtsham ur Rehman, Sibghat Ullah, Muhammad Atif, Ali Tariq. A review on laser cladding of high-entropy alloys, their recent trends and potential applications. *Journal of Manufacturing Processes.* 2021;68(B):225–273. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.041

9. Li Xing, Wang Quanjie, Zhang Qirui, Guan Yingchun, Zhou Wei. Interface analyses and mechanical properties of stainless steel/nickel alloy induced by multi-metal laser additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;91:53–60. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.02.038

10. Vimalraj S, Varahamoorthi R, Umesh Bala A, Karthikeyan R. Modeling and optimizing the laser parameters for corrosion resistance in 316 SS laser hardfaced surface using tungsten carbide. *Materials Today: Proceedings*. 2020;26(2):2485–2490. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.529

11. Bo Li, Bo Qian, Yi Xu, Zhiyuan Liu, Jianrui Zhang, Fuzhen Xuan. Additive manufacturing of ultrafine-grained austenitic stainless steel matrix composite via vanadium carbide reinforcement addition and selective laser melting: Formation mechanism and strengthening effect. *Materials Science and Engineering: A.* 2019;745:495–508. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.008

12. Yong Chen, Hui Chen, JingQing Chen, Jun Xiong, Ying Wu, ShiYun Dong. Numerical and experimental investigation on thermal behavior and microstructure during selective laser melting of high strength steel. *Journal of Manufacturing*. 2020;57:533–542. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.041

13. Niendorf T, Leuders S, Riemer A, Richard HA, Tröster T, Schwarze D. Highly anisotropic steel processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions B.* 2013;44(4):794–796. https://doi.org/10.1007/s11663-013-9875-z

14. Michael Katancik, Saereh Mirzababaei, Milad Ghayoor, Somayeh Pasebani. Selective laser melting and tempering of H13 tool steel for rapid tooling applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;849:1563–1572. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156319

15. Brover GI, Shcherbakova EE. Aspects of structure formation in surface layers of steel after laser alloying from various coatings. *Metallurgist*. 2022;66:672–680. https://doi.org/10.1007/s11015-022-01375-2

16. Benarji K, Ravi kumar Y, Jinoop AN, Paul CP, Bindra KS. Effect of WC composition on the microstructure and surface properties of laser directed energy deposited SS 316-WC Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(9):6732–6742. https://doi.org/10.1007/s11665-021-05971-2

17. Brover AV, Brover GI, Moysova OB. The role of local plastic deformation in the formation of structure and properties of materials under extreme heating. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;680(1):556–562. https://doi.org/10.1088/1757-899X/680/1/012019

18. Brover AV, Brover GI. On recrystallization behaviour in high-speed steels under pulsed laser illumination. *Vestnik of Don State Technical University.* 2011;11(9):1601–1610. URL: https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/895/890 (accessed: 25.08.2023). (In Russ.).

19. Pustovoit VN, Dombrovskii YM, Dolgachev YV. Structural identification of the phenomenon of “white zone”. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017;59:3–7. https://doi.org/10.1007/s11041-017-0092-2

20. Brover AV, Brover GI. The morphology of carbide and nitride coatings on steels after laser irradiation. *Materials Science Forum.* 2020;989:145–151. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.145

Поступила в редакцию 03.09.2023
Поступила после рецензирования 24.09.2023
Принята к публикации 25.09.2023

Об авторах:

Галина Ивановна Бровер, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 8344-3147, ORCID, Author ID, Scopus, brover@mail.ru

Елена Евгеньевна Щербакова, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 9842-0007, ORCID, Author ID, Researcher ID, Scopus, sherbakovaee@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Г.И. Бровер — постановка задачи, выбор методов и методик исследований, планирование экспериментов, участие в проведении металлофизических исследований и в обсуждении их результатов.

Е.Е. Щербакова — критический обзор литературных источников по теме исследования, участие в проведении металлофизических экспериментов и в обсуждении их результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 03.09.2023
Revised 24.09.2023
Accepted 25.09.2023

About the Authors:

Galina I. Brover, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Materials Science and Technology of Metals Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 8344-3147, ORCID, Author ID, Scopus, brover@mail.ru

Elena E. Shcherbakova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Materials Science and Technology of Metals Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 9842-0007, ORCID, Author ID, Researcher ID, Scopus, sherbakovaee@mail.ru

Claimed contributorship:

GI Brover: problem statement, selection of research methods and techniques, planning of experiments, participation in metal physical researches and their results discussion;

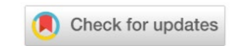
EE Shcherbakova: critical review of literature sources on the topic of research, participation in metal physical experiments and their results discussion.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY





УДК 621.86
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-119-130

Научная статья

Снижение износа высоконагруженных узлов транспортных средств

А.А. Демьянов ✉, **И.Н. Щербаков**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ alexys61@yandex.ru

Аннотация
Введение. Опорно-поворотный узел обеспечивает связь между поворотной и неповоротной частью машин и механизмов кранов, экскаваторов, автоприцепов, железнодорожных подвижных составов. Применительно к подвижному составу он соединяет грузонесущую часть вагона с тележкой и является одним из наиболее ответственных и быстроизнашивающихся узлов трения. Его техническое состояние влияет на интенсивность и форму износа самих поверхностей, величину сопротивления повороту тележки при движении вагона на криволинейных участках пути, амплитуду боковой раскачки вагона, интенсивность износа гребней колес и, как следствие, на безопасность эксплуатации подвижного состава в целом. До сих пор для данного узла применяется периодическая консистентная смазка, которая даже при небольшом пробеге успевает выдавиться из зон контакта и тем самым создать условия для преобладания сухого трения. До настоящего времени различные предложения по решению этой проблемы не нашли применения в серийном производстве по ряду причин, и поэтому поиск путей снижения износа в опорно-поворотном узле вагонов до сих пор является актуальным. В данном исследовании предлагается решение этой проблемы, не требующее конструктивных изменений самого опорно-поворотного узла. Целью данной работы является разработка технологичного антифрикционного покрытия с хорошей адгезией, которое будет нанесено на поверхность сменного диска, устанавливаемого между трущимися поверхностями шкворневого узла во время плановых ремонтов ходовой части вагона. Такой подход позволит снизить силу трения и интенсивность износа в узле при наступлении смазочного голодания из-за выдавливания консистентной смазки.
Материалы и методы. Антифрикционные характеристики разработанного покрытия определялась на машине трения, обеспечивающей нагрузки на исследуемый образец до 5 000 Н и скорости скольжения от 0,13 м/с. Образцы исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (микроскоп FEI Quanta 200). СЭМ-изображения получены в режиме регистрации обратно-рассеянных электронов (BSE) с помощью полупроводникового детектора. Для анализа элементного состава образца использовался рентгеновский энерго-дисперсионный спектрометр (EDAX Element EDS System).
Результаты исследования. Разработано трехслойное функциональное фосфорсодержащее композиционное покрытие поверхностей узла, позволяющее существенно снизить в нем коэффициент трения и, как следствие, интенсивность износа шкворневого узла из-за сухого трения. Определены оптимальные условия получения слоев композиционного покрытия. Изучено влияние толщины каждого слоя и условий его нанесения на функциональные характеристики.
Обсуждение и заключение. Предложенное решение отличается технологичностью и при соответствующей адаптации может быть использовано для снижения интенсивности износа в любом открытом опорно-поворотном узле без кардинального изменения его конструкции. Методы получения слоев покрытия доступны и технологичны для серийного применения.

Ключевые слова: рельсовый подвижной состав, шкворневой узел, открытый узел трения, композиционное многослойное покрытие, снижение износа

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Демьянов А.А., Щербаков И.Н. Снижение износа высоконагруженных узлов транспортных средств. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;23(4):119–130. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-119-130

Original article

Wear Reduction in Heavily Loaded Units of Transport Vehicles

Aleksey A. Demyanov ✉, **Igor N. Shcherbakov**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ alexys61@yandex.ru

Abstract
Introduction. The pivot assembly provides connection between the rotating and non-rotating parts of machines and mechanisms such as cranes, excavators, trailers, railway rolling stocks. In relation to rolling stock, it connects the load-carrying part of the car with the bogie and is one of the most critical and wear-out friction units. Its technical condition affects the intensity and form of wear of the surfaces themselves, the amount of resistance to rotation of the bogie when the car moves in curved sections of the track, the amplitude of the lateral rocking of the car, the intensity of wear of the wheel flanges and, as a consequence, the safety of operation of the rolling stock as a whole. Until now, periodic grease is used for this unit, which, even with a short mileage, manages to be squeezed out of the contact zones and, thereby, creates conditions for the predominance of dry friction. Until now, various proposals to solve this problem have not found application in mass production for a number of reasons, and therefore the search for ways to reduce wear in the pivot assembly of cars is still relevant. This study proposes a solution to this problem that does not require structural changes to the pivot assembly itself. The aim of this work was to develop a technologically advanced anti-friction coating with good adhesion, which will be applied to the surface of a replaceable disk installed between the rubbing surfaces of the pivot assembly during scheduled repairs of the car chassis. This approach will reduce the friction force and wear rate in the unit when lubrication shortage occurs due to squeezing out of the grease.
Materials and Methods. Antifriction characteristics of the developed coating was observed on a friction machine providing specific loads on the test sample up to 5000 N and a sliding speed from 0.13 m/s. The samples were examined by scanning electron microscopy (FEI Quanta 200 microscope). SEM images were acquired in a back-scattered electron (BSE) mode using a semiconductor detector. To analyze the elemental composition of beam samples, an energy dispersive spectrometer (EDAX Element EDS system) was used.
Results. A three-layer functional phosphorus-containing composite coating of the surfaces of the unit was developed, which made it possible to significantly reduce the coefficient of friction and, as a consequence, the intensity of wear of the pivot unit surface during dry friction. The optimal conditions for obtaining composite coating layers were determined. The influence of the thickness of each layer and the conditions for its production on its functional characteristics was studied.
Discussion and Conclusion. The proposed solution is manufacturable and, with appropriate adaptation, can be used to reduce wear in any open pivot assembly without radically changing its design. The methods for producing coating layers are accessible and technologically advanced for serial use.

Keywords: rail rolling stock, pivot assembly, open friction assembly, composite multilayer coating, wear reduction

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Demyanov AA, Shcherbakov IN. Wear Reduction in Heavily Loaded Units of Transport Vehicles. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):119–130. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-119-130

Введение. На железнодорожном транспорте одним из наиболее ответственных и быстроизнашивающихся узлов трения является опорно-поворотный узел, соединяющий кузов с тележкой вагона. Общеизвестной проблемой этого узла является самовыдавливание смазки из него даже при незначительных пробегах с последующим контактом поверхностей в режиме сухого трения и соответствующей интенсивностью износа [1].

В настоящее время только плановое восстановление изношенных опорно-поворотных узлов ежегодно выливается в огромные суммы, даже без учета потерь от простоя вагонов и затрат на их внеплановый ремонт. Если принять во внимание тот факт, что в нашей стране вагонов, находящихся в обороте, более 1,3 млн, то задача снижения трения и износа в этом узле является актуальной. Эта проблема является отраслевой в

масштабе всех индустриально развитых стран мира [2]. К настоящему времени существуют различные подходы к решению этой проблемы, которые укрупненно можно разделить на несколько принципиальных групп.

К первой группе относятся методы, в основе которых лежит изменение конструкции узла с целью увеличения диаметра опорной поверхности и, как следствие, уменьшение удельных нагрузок. Недостатком такого подхода является исключение взаимозаменяемости элементов узла при массовом ремонте. Во второй группе — методы, при которых между трущимися поверхностями устанавливаются сменные вкладыши из различных полимерных износостойких материалов в виде круглого корыта с кольцевыми канавками на дне для накопления смазки. Наличие сменного элемента удешевляет ремонт данного узла. Однако в тяжелых условиях эксплуатации шкворневого узла полимерные материалы имеют очень небольшой срок службы. Третья группа включает в себя методы, при которых между трущимися поверхностями устанавливаются сменные вкладыши из высокопрочных сталей, например, марганцовистой. Однако такой подход не исключает износ поверхности самого опорно-поворотного узла. После неизбежного выдавливания вязкой смазки интенсивность изнашивания будет определяться соотношением твердости контактирующих поверхностей сменного диска и основного узла. К четвертой группе методов можно отнести методы совершенствования термической обработки контактирующих поверхностей.

Еще одним вариантом решения устранения повышенного трения в шкворневом узле является установка между трущимися поверхностями менее твердого диска с отверстиями, распределенными по всей его поверхности. Перфорация в диске заполняется твердой смазкой. Подача смазки на поверхность трения в этом случае носит адаптивный характер и определяется интенсивностью износа поверхности сменного диска (рис. 1) [3].

Поскольку выдавливание вязкой смазки и периодический контакт поверхностей в режиме сухого трения в данном узле неизбежен, то предлагается повысить долговечность этого узла посредством снижения интенсивности изнашивания за счет установки между поверхностями трения сменного диска с нанесенным прочным и технологичным антифрикционным покрытием. При таком подходе смазочное голодание при выдавливании консистентной регламентной смазки будет меньше влиять на интенсивность износа и, как следствие, продлевать долговечность этого узла [4–6].

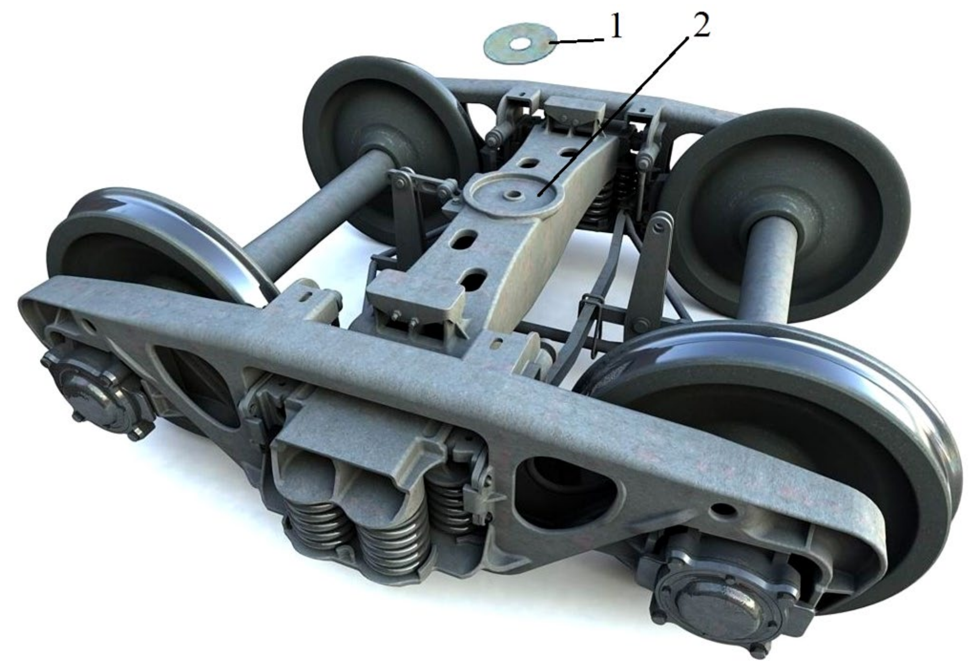


Рис. 1. Опорно-поворотный узел подвижного состава: 1 — сменный диск; 2 — рама с подпятником

Модификация поверхностей функциональными покрытиями является хорошо проверенным методом повышения износостойкости узлов, работающих в сложных условиях — при высоких нагрузках, отсутствии или перебоях в подаче смазки в зону трения, в агрессивно-абразивных средах и т. п. [7–13].

В данном исследовании целью являлась разработка покрытия, обеспечивающего на поверхностях низкого коэффициента трения, а также создание условий жесткого динамического контакта надежного сцепления с материалом покрываемого изделия.

Материалы и методы. Решать поставленную задачу было принято посредством разработки трехслойного покрытия из комбинации нескольких слоев фосфорсодержащего композита [14]. Для соблюдения заданных требований проводилось изучение влияния толщины каждого слоя и условий его изготовления на его

функциональные характеристики. Покрытие наносилось послойно. В качестве материала для основы, т. е. сменного диска, была выбрана хромистая сталь.

Первый наносимый слой состоял из композиционного никель-фосфорного соединения, модифицированного дисульфидом молибдена. В его задачи входило обеспечение высокой адгезии к основе. Получали данный слой методом химического осаждения. Последующий слой изготавливали на основе фосфатного связующего [14, 15], задачей которого являлось обеспечение связки первого слоя с третьим и повышение коррозионной стойкости ввиду того, что шкворень — это открытый узел трения. С целью снижения себестоимости и повышения технологичности слой получали несколькими простыми и технологичными методами (распылением, окунанием и намазыванием) с последующей сравнительной оценкой его функциональных свойств. Третий слой, обеспечивающий антифрикционные свойства, также получали методом распыления и намазывания с последующей сравнительной оценкой его свойств [14,15].

Качество адгезии слоя к предыдущему оценивалось по результатам методики решетчатых надрезов Cross-cut test, производимых резцом-адгезиметром[1]. Толщина каждого слоя измерялась толщиномером комбинированного действия. Антифрикционные параметры третьего слоя определялись на машине трения ИИ 5018. Анализ поверхности слоев проводился методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе FEI Quanta 200. СЭМ-изображения были получены в режиме регистрации обратно-рассеянных электронов (BSE) с помощью полупроводникового детектора. Для анализа элементного состава образца использовался рентгеновский энерго-дисперсионный спектрометр EDAX Element EDS System.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований проводилась компьютерными методами обработки результатов инженерного эксперимента.

В процессе исследований определялись условия, оказывающие влияние на конечные параметры получаемого покрытия. Исследовалось, как влияют:

– температура раствора на толщину образующегося покрытия;
– толщина третьего слоя на его сцепление с предыдущим;
– толщина третьего слоя и условий его получения на величину его коэффициента трения.

Первый слой (никель-фосфорное покрытие) был получен химическим осаждением. Для обеспечения седиментационной устойчивости присутствующих в растворе химического осаждения модификаторов был применен магнитный миксер ПЭ-6110 с функцией подогрева. Процесс осаждения этого слоя происходил в условиях 90–92 °С. Адгезия покрытия к основанию оценивалась по стандартной для таких случаев методике[2]. Второй слой (фосфатное покрытие), согласно идее, наносился тремя разными методами: окунанием, намазыванием и распылением [14]. Третий (антифрикционный) слой был получен несколькими методами — распылением и намазыванием поверх фосфатного связующего [15].

Поскольку слои полученного композиционного покрытия не работоспособны без термической обработки, было исследовано влияние режимов термообработки слоев на их конечные свойства с последующим подбором оптимального режима для каждого из них.

После нанесения на первый, второй слой подвергался термической обработке при температуре от 250 до 400 °С в течение одного часа. Режим термической обработки не зависел от способа нанесения второго слоя. Он подбирался экспериментально с учетом наилучших показателей по количеству сквозных пор до основы [11]. После нанесения третьего слоя на второй, проводилась его термообработка в диапазоне температур от 300 до 450 °С в течение одного часа. Для исследования антифрикционных свойств третьего слоя, в зависимости от температуры термообработки, было проведено модельное испытание нескольких образцов, полученных при разной температуре.

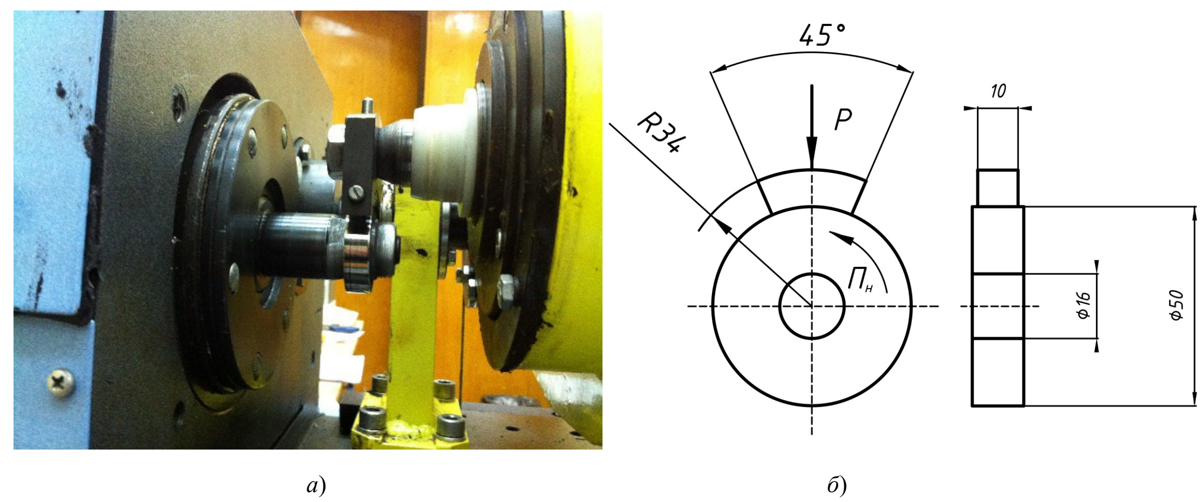
Определение фрикционных характеристик третьего слоя производилось по схеме «диск-колодочка». Покрытие наносилось на образец «колодочка». Общий вид и схема сопряжения образцов приведены на рис. 2.

При назначении нагрузки для модельного эксперимента исходили из того, что наиболее распространенным видом подвижного состава являются грузовые полувагоны различных модификаций с усредненной грузоподъемностью порядка 70 и массой 23 тонны. С учетом того, что на каждый опорный узел приходится половина суммарного веса, а диаметр подпятника и диаметр отверстия под шкворень составляют 302 и 54 мм соответственно, получили фактические контактные давления, которое составило 6,7 МПа.

Скорость относительного скольжения поверхностей в опорно-поворотном узле определяется радиусом кривой, в которую входит вагон, и его текущей скоростью, задаваемой машинистом в зависимости от условий

[1] *Paints and varnishes. Cross-cut test.* ISO 2409:2020. https://www.iso.org/standard/76041.html
[2] ГОСТ 9.302-88. *Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля.* URL: https://gostrf.com/normadata/1/4294850/4294850372.pdf

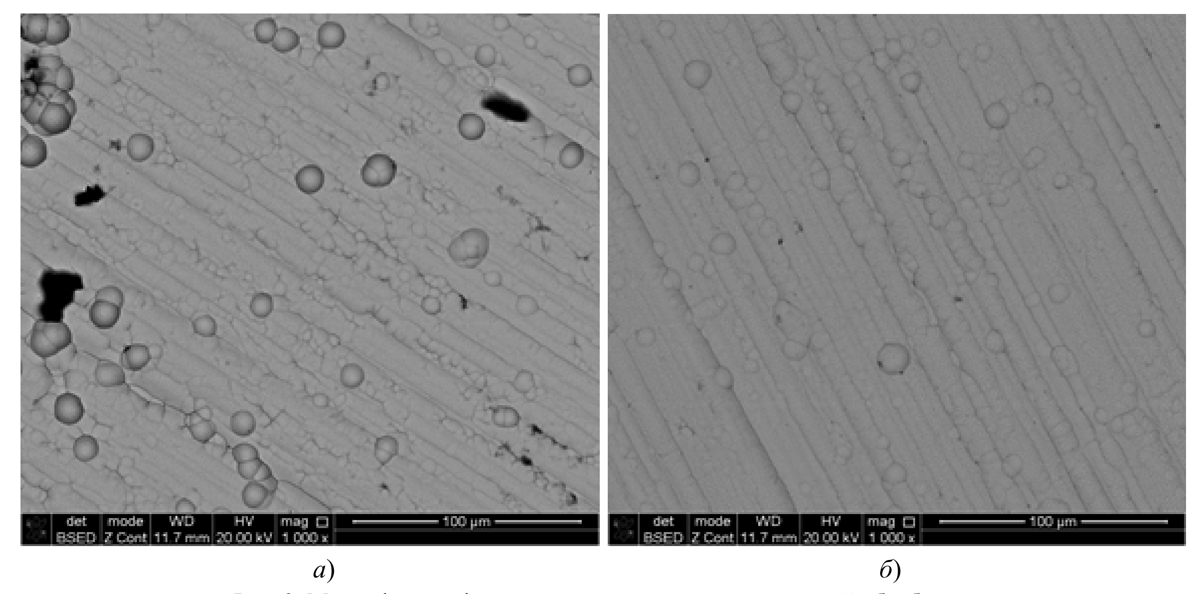
движения. Поскольку на практике скорость скольжения имеет малые значения, то для сравнительного исследования между образцами была принята минимально возможная частота вращения вала нижнего образца, 50 мин $^{-1}$.



а) б)

Рис. 2. Образцы «диск-колодка»: *а* — общий вид; *б* — схема сопряжения

Результаты исследования. В ходе исследования было установлено, что первый слой лучше всего получается при использовании химического осаждения со скоростью до 40 мкм/ч. Было выявлено значительное влияние на толщину и качество получаемого покрытия температуры раствора и концентрации компонентов. На основании полученных результатов по измерению адгезии было установлено, что термическую обработку первого слоя лучше всего делать при температуре 400°С в течение одного часа. При данной температуре образуются фаза Ni и износостойкий Ni_3P [14, 15]. Микрофотографии слоя представлены на рис. 3, элементный анализ в таблицах 1 и 2, а распределение элементов в первом слое — на рис. 4.



а) б)

Рис. 3. Микрофотографии первого слоя: *а* — до термической обработки;
б — после обработки при температуре 400 °С в течение одного часа

Таблица 1

Элементный анализ первого слоя до термической обработки

Element	Weight, %	MDL	Atomic, %	Error, %
C K	8,3	0,56	28,5	14,1
O K	0,6	0,22	1,6	23,5
P K	9,3	0,12	12,5	7,0
Ni K	79,9	0,41	56,4	2,2
Y K	2,1	0,22	1,0	10,7

Таблица 2

Элементный анализ первого слоя после термической обработки

Element	Weight, %	MDL	Atomic, %	Error, %
C K	7,6	0,52	26,5	14,2
O K	1,4	0,19	3,6	13,5
P K	8,9	0,14	12,0	7,0
Ni K	80,1	0,33	57,0	2,2
Y K	2,1	0,20	1,0	10,7

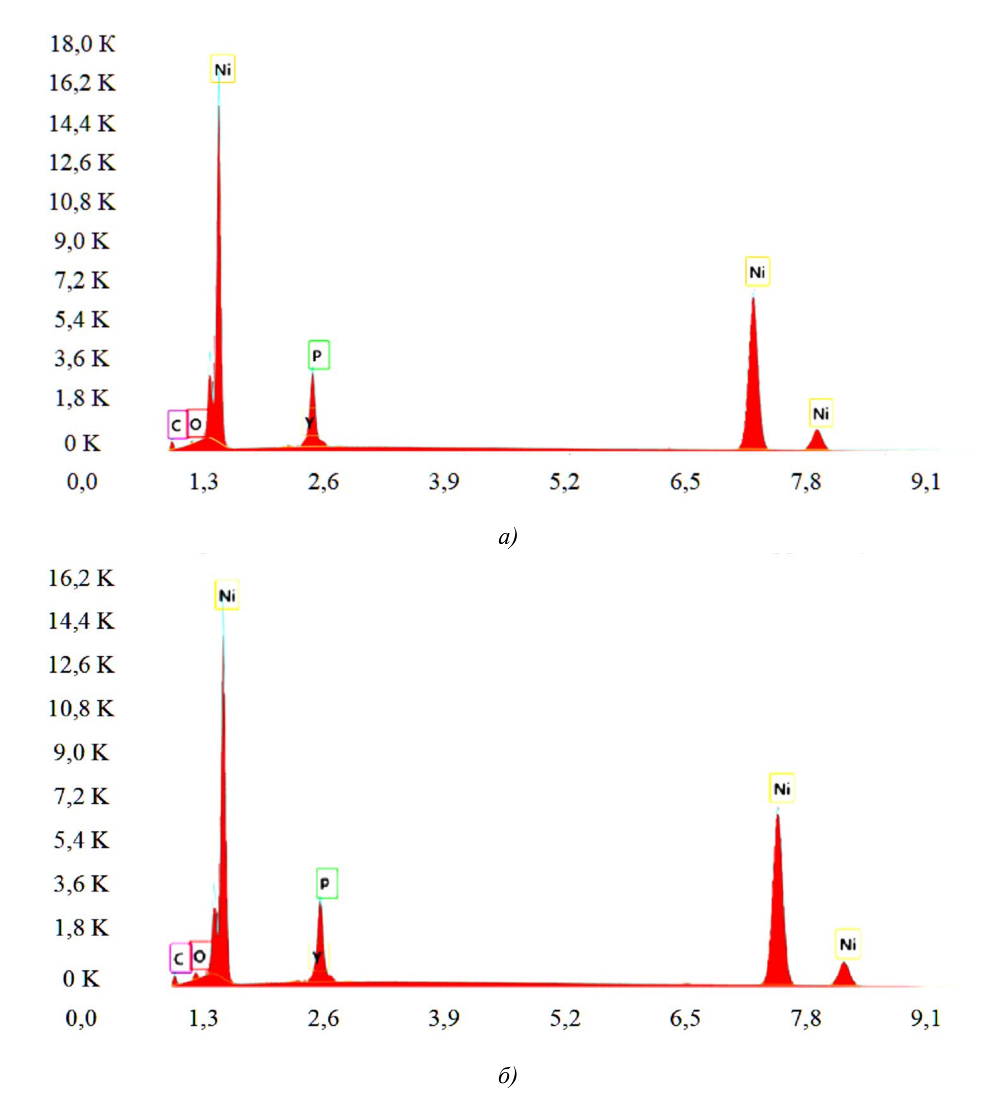


Рис. 4. Распределение элементов в первом слое:
а — до термической обработки; *б* — после обработки при температуре 400 °C в течение одного часа

По приведенным на рис. 4 данным видно, что при термической обработке происходит перераспределение таких химических элементов, как Ni, O, P. При температуре термообработки 400 °C не обнаружено ни одной сквозной поры. На защитные свойства второго слоя покрытия оказывают влияние технологические режимы его обработки. Предполагаемые фазы, образованные после термической обработки второго слоя: $AlPO_4$, $Al_4(P_2O_7)_3$, Ni_3Al, NiAl, Al_3Ni, $NiCrO_4AlPO_4$, $CrPO_4$, $Al(P_2O_7)_3$ [14].

На рис. 5 представлена микрофотография второго слоя, а на рис. 6 — зависимость изменения толщины второго слоя от температуры термообработки и способа нанесения покрытия. По результатам испытаний установлено, что при температуре термообработки 350 °C в течение одного часа обеспечивается наименьший для данного покрытия коэффициент трения 0,07. Это значительно меньше, в сравнении с исходным коэффициентом трения 0,10–0,12 при нормальной работе узла и до 0,18 при выдавливании смазки. В таблице 3 приведены данные по исследованию антифрикционных свойств третьего слоя в зависимости от температуры

его термообработки. Предлагаемое покрытие обеспечивает снижение коэффициента трения почти вдвое, по сравнению с исходным узлом даже при сухом трении.

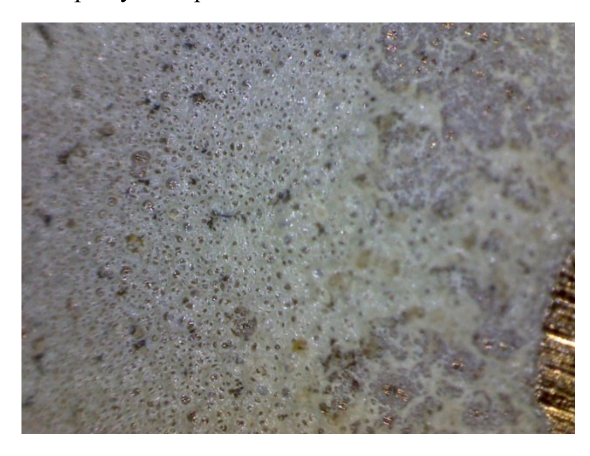


Рис. 5. Микрофотографии второго слоя, ×200

Таблица 3

Влияние температуры термообработки образцов на их антифрикционные свойства

Температура термообработки, °C	300	350	400	450
Коэффициент трения	0,09	0,07	0,09	0,12

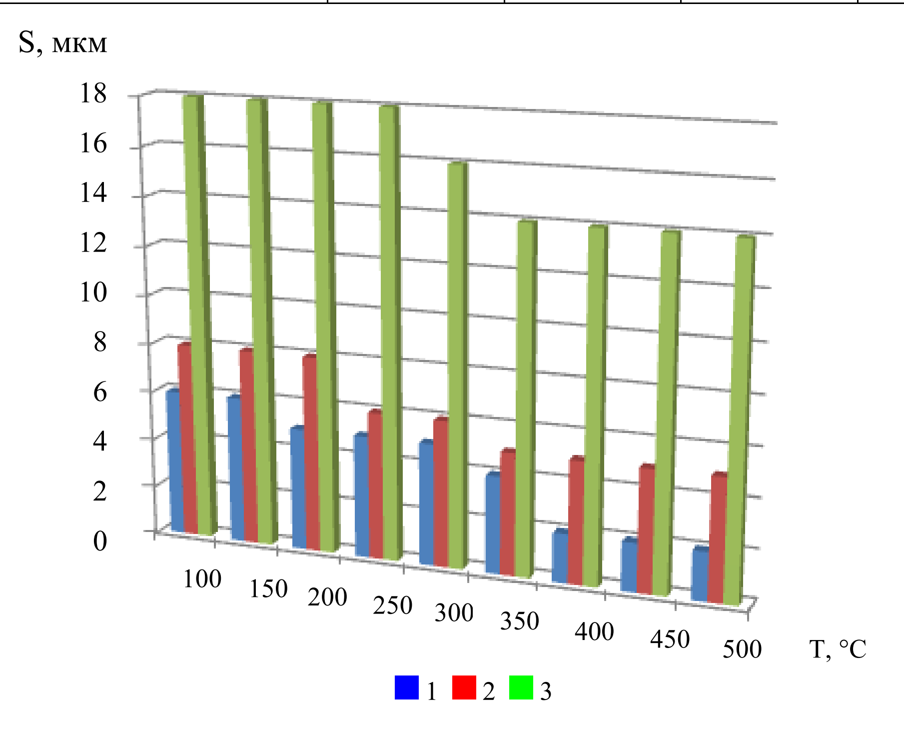


Рис. 6. Изменение толщины второго слоя, получаемое в зависимости от температуры термообработки и способа нанесения покрытия: 1 — метод распыления; 2 — метод окунания; 3 — метод намазывания

Зависимость толщины третьего слоя от температуры и продолжительности термообработки представлена рис. 7.

На рис. 8 представлена микрофотография, а на рис. 9 — элементный анализ третьего слоя, полученного при температуре термообработки 350 °C в течение одного часа.

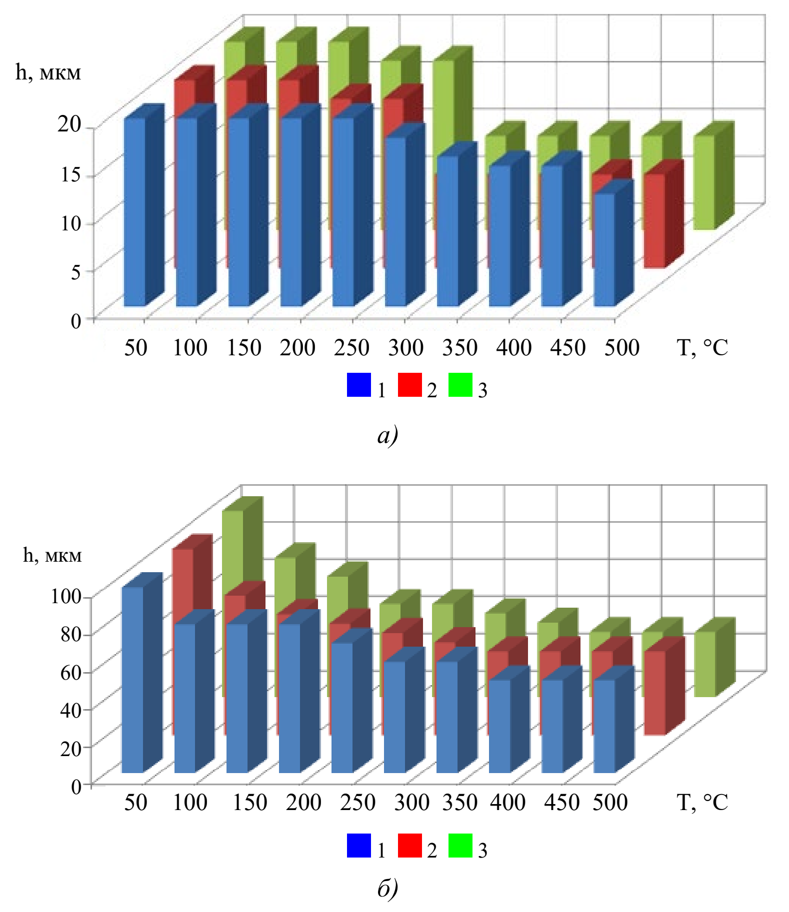


Рис. 7. Изменение толщины третьего слоя при различных сочетаниях температуры и времени термообработки: 1 — 60 мин.; 2 — 120 мин.; 3 — 180 мин.;
а — покрытие получено методом напыления; *б* — покрытие получено методом намазывания

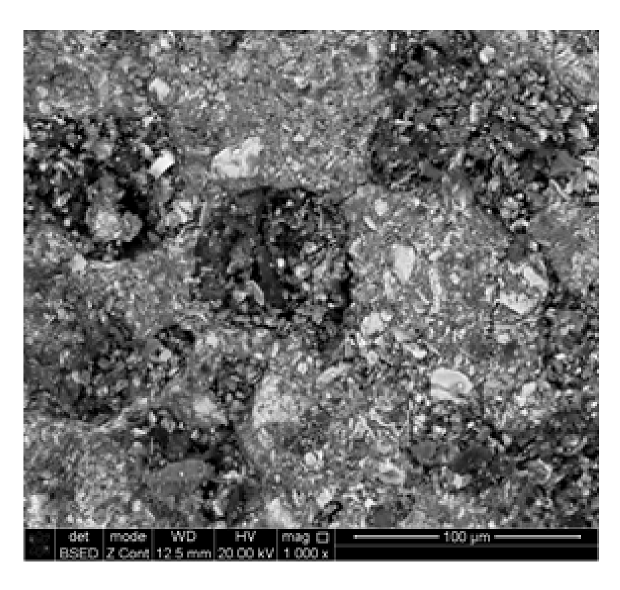


Рис. 8. Микрофотографии третьего слоя

При измерении адгезии третьего слоя в зависимости от его толщины (рис. 10) было установлено, что наилучшие значения результатов получаются при толщине покрытия не более 20 мкм, что и было принято оптимальным.

По результатам полученных зависимостей сформирована рекомендация по достижению оптимальных параметров последнего антифрикционного слоя композиционного покрытия (таблица 4).

Таблица 4

Значения оптимальных параметров для антифрикционного слоя

Element	Weight, %	MDL	Atomic, %	Error, %
O K	35,7	0,23	60,3	10,6
Ne K	0,3	0,13	0,5	24,1
Mg K	1,3	0,10	1,5	10,2
P K	17,4	0,09	15,2	4,7
S K	14,3	0,37	12,1	5,0
Fe K	1,7	0,19	0,8	8,5
Ni K	2,5	0,28	1,1	7,8
Zn K	7,1	0,33	2,9	4,9
Sr L	0,6	0,15	0,2	11,2
Mo L	17,6	0,85	5,0	5,4
Cd L	1,5	0,23	0,4	17,8

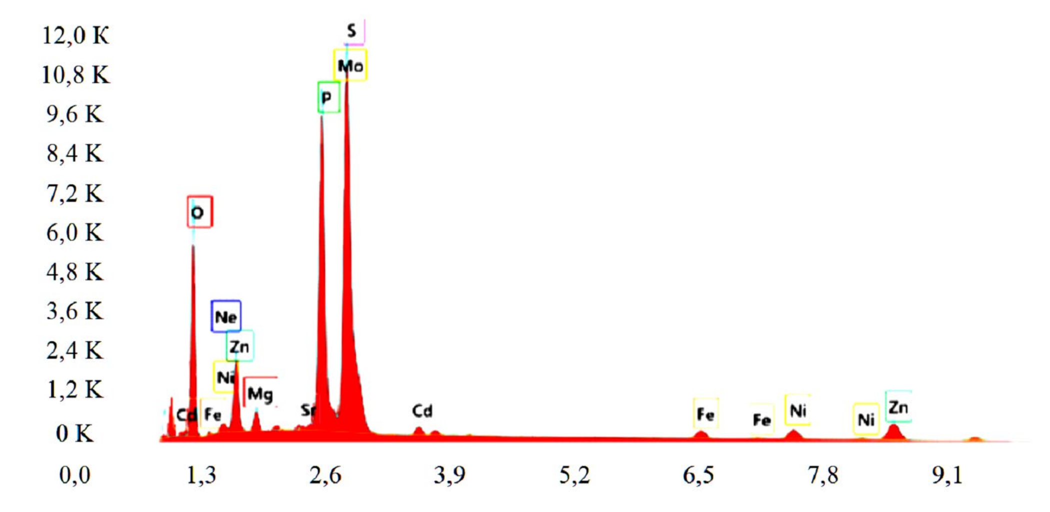


Рис. 9. Элементный анализ третьего слоя

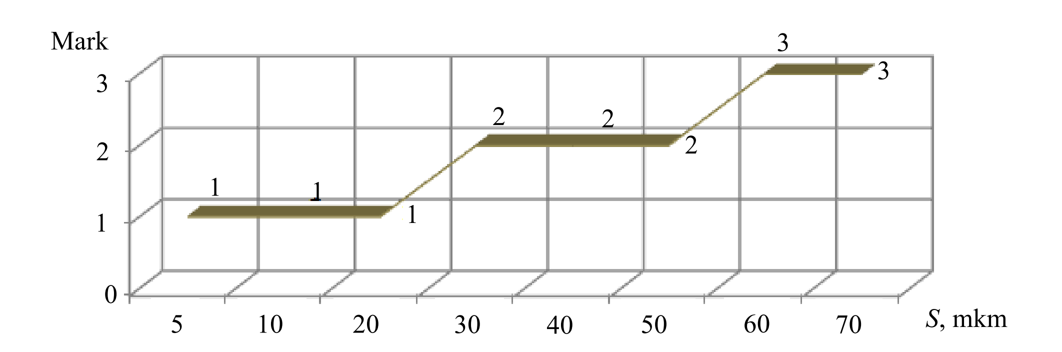


Рис. 10. Изменение адгезии третьего слоя покрытия в зависимости от его толщины

Обсуждение и заключение. Согласно полученным результатам, образец, полученный при температуре термообработки 350 °C и выдержке в течение одного часа, обеспечивает наименьший из возможных для данного покрытия коэффициент трения. По мнению авторов, это объясняется тем, что повышение температуры выше 350 °C обуславливает появление оксидных структур, повышающих коэффициент трения. Температура ниже 350 °C не позволяет сформироваться фосфорсодержащим фазам, повышающим антифрикционные свойства третьего слоя, что соответствует ранее проведенным исследованиям [15].

Полученные результаты позволят увеличить долговечность самого узла, снизить износ гребней колес и рельсов и повысить безопасность перевозок.

К очевидным достоинствам предлагаемого решения можно отнести то, что оно:

– не требует принципиальных изменений в конструкции фрикционного узла;

– отличается простотой и технологичностью нанесения покрытия;

– не требует значительных материальных затрат;

– не отменяет применения регламентной смазки, а дополняет ее;

– является универсальным.

Предложенное решение вполне может быть применено в любых узлах, например, в сцепных устройствах автомобильного подвижного состава, различных узлах грузоподъемных и транспортных машин, узлах технологического оборудования и т. п.

Список литературы

1. Быков Б.В. *Конструкция и техническое обслуживание грузовых вагонов.* Москва: Желдориздат «Трансинфо»; 2006. 125 с.

2. Павлицкий Б.И. *Повышение надежности опорно-поворотных устройств на основе принципа построения адаптивных систем.* Дисс. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону; 2018. 138 с.

3. Демьянов А.А. Демьянов А.А., Павлицкий Б.И. *Шкворневая система.* Патент РФ, № 2513093. 2014. 5 с. URL: https://www.freepatent.ru/patents/2513093 (дата обращения: 02.10.2023).

4. Demyanov A., Demyanov A., Pavlitskiy B., Sherbakov I., Shapshal A., Shapsha S. Reliability improvement of heavy machineries friction units. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2019;403:012015. https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012015

5. Федяева Е.А., Ольшевский А.А. Моделирование износа пятникового узла грузового вагона. *Вестник Брянского государственного технического университета.* 2009;(3(23)):83–86.

6. Мотовилов К.В. (ред.), Лукашук В.С., Криворудченко В.Ф. Петров А.А. *Технология производства и ремонта вагонов.* Москва: Маршрут; 2003. 382 с.

7. Shashkeev K.A., Popkov O.V., Yurkov G.Y., Kondrashov S.V., Ashmarin A.A., Biryukova M.I. Composite tribological materials based on molybdenum disulfide nanoparticles and polytetrafluoroethylene microgranules. *Russian Journal of Applied Chemistry.* 2016;89(4):644–649. https://doi.org/10.1134/S1070427216040194

8. Xiaoming Chen, Liuyang Zhang, Cheol Park, Catharine C. Fay, Xianqiao Wang, Changhong Ke. Mechanical strength of boron nitride nanotube-polymer interfaces. *Applied Physics Letters.* 2015;107(25):253105. https://doi.org/10.1063/1.4936755

9. Kucernak A.R.J., Venkata N. Naranammalpuram Sundaram. Nickel phosphide: the effect of phosphorus content on hydrogen evolution activity and corrosion resistance in acidic medium. *Journal of Materials Chemistry A*. 2014;2:17435–17445. https://doi.org/10.1039/c4ta03468f

10. Kumaravelu P., Arulvel S., Kandasamy J. *Coatings and surface modification techniques for additive manufacturing in innovations in additive manufacturing surface.* In: Khan M.A., Jappes J.T.W. (eds) Innovations in Additive Manufacturing. Springer Tracts in Additive Manufacturing. Springer, Cham. 2022. P. 221–238. http://doi.org/10.1007/978-3-030-89401-6_10

11. Ren Ping, Zhang Shangzhou, Qiu Jianxun, Yang Xiaoyang, Wang Weiwei, Li Yang et al. Self-lubricating behavior of VN coating catalyzed by solute Ag atom under dry friction and oil lubrication. S*urface and Coatings technology.* 2020;409:126845. http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126845

12. Ji Lianggang, Chen Zhaoqiang, Guo Runxin, Xu Chonghai, Guo Niansheng. Preparation of nano-coating powder CaF2Al(OH)3 and its application in Al2O3/Ti(C,N) self-lubricating ceramic tool materials. *Ceramics International*. 2020;46(10.B):15949–15957. http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.144

13. Pinate S., Leisner P., Zanella C. Wear resistance and self-lubrication of electrodeposited Ni-SiC:MoS2 mixed particles composite coatings. *Surface and Coatings technology.* 2021;421:127400. https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2021.127400

14. Щербаков И.Н., Трофимов Г.Е., Дерлугян П.Д., Логинов В.Т., Геркен Н.В. *Способ получения композиционного антифрикционного покрытия.* Патент РФ № 2556155. 2015. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2556155C2_20150710.pdf (дата обращения: 02.10.2023)

15. Щербаков И.Н. Особенности получения и свойства композиционного многослойного твердого смазочного покрытия. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2016;(2):97–101. https://doi.org/10.17213/0321-2653-2016-2-97-101

16. Щербаков И.Н., Иванов В.В., Дерлугян П.Д., Логинов В.Т. Получение и свойства композиционного твердого смазочного покрытия. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2015;(4):89–92. https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-4-89-92

References

1. Bykov BV. *Konstruktsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie gruzovykh vagonov.* Moscow: Zheldorizdat Transinfo; 2006. 125 p. (In Russ.)

2. Pavlitskii BI. *Povyshenie nadezhnosti oporno-povorotnykh ustroistv na osnove printsipa postroeniya adaptivnykh sistem.* Author's thesis. Rostov-on-Don; 2018. 138 p. (In Russ.)

3. Demyanov AA, et al. *Shkvornevaya Sistema.* Patent RF, No. 2513093. 2014. 5 p. URL: https://www.freepatent.ru/patents/2513093 (accessed 02.10.2023). (In Russ.)

4. Demyanov A, Demyanov A, Pavlitskiy B, Sherbakov I, Shapshal A, Shapsha S. Reliability improvement of heavy machineries friction units. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2019;403:012015. https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012015

5. Fedyaeva EA, Olshevskii AA. Modelirovanie iznosa pyatnikovogo uzla gruzovogo vagona. *Bulletin of Bryansk state technical university.* 2009;(3(23)):83–86. (In Russ.)

6. Motovilov KV (ed.), Lukashuk VS, Krivorudchenko VF, Petrov AA. *Tekhnologiya proizvodstva i remonta vagonov.* Moscow: Marshrut; 2003. 382 p. (In Russ.)

7. Shashkeev KA, Popkov OV, Yurkov GY, Kondrashov SV, Ashmarin AA, Biryukova MI. Composite tribological materials based on molybdenum disulfide nanoparticles and polytetrafluoroethylene microgranules. *Russian Journal of Applied Chemistry.* 2016;89(4):644–649. https://doi.org/10.1134/S1070427216040194

8. Xiaoming Chen, Liuyang Zhang, Cheol Park, Catharine C. Fay, Xianqiao Wang, Changhong Ke. Mechanical strength of boron nitride nanotube-polymer interfaces. *Applied Physics Letters.* 2015;107(25):253105. https://doi.org/10.1063/1.4936755

9. Kucernak ARJ, Venkata N Naranammalpuram Sundaram. Nickel phosphide: the effect of phosphorus content on hydrogen evolution activity and corrosion resistance in acidic medium. *Journal of Materials Chemistry A*. 2014;2:17435–17445. https://doi.org/10.1039/c4ta03468f

10. Kumaravelu P, Arulvel S, Kandasamy J. *Coatings and surface modification techniques for additive manufacturing in innovations in additive manufacturing surface.* In: Khan M.A., Jappes J.T.W. (eds) Innovations in Additive Manufacturing. Springer Tracts in Additive Manufacturing. Springer, Cham. 2022. P. 221–238. http://doi.org/10.1007/978-3-030-89401-6_10

11. Ren Ping, Zhang Shangzhou, Qiu Jianxun, Yang Xiaoyang, Wang Weiwei, Li Yang et al. Self-lubricating behavior of VN coating catalyzed by solute Ag atom under dry friction and oil lubrication. S*urface and Coatings technology.* 2020;409:126845. http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126845

12. Ji Lianggang, Chen Zhaoqiang, Guo Runxin, Xu Chonghai, Guo Niansheng. Preparation of nano-coating powder CaF2Al(OH)3 and its application in Al2O3/Ti(C,N) self-lubricating ceramic tool materials. *Ceramics International*. 2020;46(10.B):15949–15957. http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.144

13. Pinate S, Leisner P, Zanella C. Wear resistance and self-lubrication of electrodeposited Ni-SiC:MoS2 mixed particles composite coatings. *Surface and Coatings technology.* 2021;421:127400. https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2021.127400

14. Shcherbakov IN, Trofimov GYe, Derlugyan PD, Loginov VT, Gerken NV. *Sposob polucheniya kompozitsionnogo antifriktsionnogo pokrytiya.* Patent RF, No 2556155. 2015. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2556155C2_20150710.pdf (accessed: 02.10.2023) (In Russ.)

15. Shcherbakov IN. Receiving features and properties of the composition multilayered solid lubricant coatings. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences.* 2016;(2):97–101. https://doi.org/10.17213/0321-2653-2016-2-97-101 (In Russ.)

16. Scherbakov IN, Ivanov VV, Derlugian PD, Loginov VT. Preparation and properties of a composite solid lubricating coating. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences.* 2015;(4):89–92. https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-4-89-92 (In Russ.)

Поступила в редакцию 05.10.2023
Поступила после рецензирования 18.10.2023
Принята к публикации 01.11.2023

Об авторах:

Алексей Александрович Демьянов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донской государственный технический университет (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 8504-0447, ORCID, ScopusID, AuthorID, alexys61@yandex.ru

Игорь Николаевич Щербаков, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, ScopusID, SPIN-код: 6729-6905, AuthorID, ResearcherID, bdd-don@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А.А. Демьянов — формирование основной концепции, обработка результатов исследований, обеспечение ресурсами, подготовка текста статьи.

И.Н. Щербаков — подготовка эксперимента, испытаний образцов, обработка результатов исследований, подготовка текста статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 05.10.2023
Revised 18.10.2023
Accepted 01.11.2023

About the Authors:

Aleksey A. Demyanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 8504-0447, ORCID, ScopusID, AuthorID, alexys61@yandex.ru

Igor N. Shcherbakov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 6729-6905, ORCID, ScopusID, AuthorID, ResearcherID, bdd-don@mail.ru

Claimed contributorship:

AA Demyanov: formulation of the basic concept, processing of the research results, provision of resources, preparation of the text of the article;

IN Shcherbakov: preparation of the experiment, testing of samples, processing of the research results, preparation of the text of the article.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.